

**PUHEEN TAAJUDET AIVOISSA: VOIMAKKUUS,  
PUOLIEROT JA YHTEYS KIELELLISIIN  
KYKYIHIN LAPSILLA JA AIKUISILLA**

Ainomaija Laitinen  
Pro gradu -tutkielma  
Psykologian laitos  
Jyväskylän yliopisto  
Marraskuu 2019

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO

Psykologian laitos

LAITINEN, AINOMAIJA: Puheen taajuudet aivoissa: voimakkuus, puolierot ja yhteys kielellisiin kykyihin lapsilla ja aikuisilla

Pro gradu -tutkielma, 34 s.

Ohjaaja: Jarmo Hämäläinen

Psykologia

Marraskuu 2019

Tässä pro gradu -tutkielmassa tarkasteltiin sitä, miten aivokuoren sisäsyntyiset oskillaatiot rytmittyvät kuultuun puheärsykkeeseen eri aivopuoliskoilla ja eri ikäisten ryhmissä. Tämän lisäksi tutkittiin myös kielellisten kykyjen ja kuuloaivokuoren rytmittymisen välisiä yhteyksiä. Aiemman tutkimuksen perusteella kuullun puheen on havaittu rytmittävän kuuloaivokuoren oskillaatiotoimintaa delta-, theeta- ja gamma-taajuuksilla. Näistä hitaammat delta- ja theeta-kaistat soveltuvat parhaiten MEG-tutkimukseen. Puheen piirteistä muun muassa sanojen ja lauseiden muutokset tapahtuvat delta-taajuuskaistaa vastaavalla nopeudella (1–3 Hz), kun taas puheen verhoikäyrä ja tavurytmi asettuvat theeta-taajuuskaistalle (4–8 Hz). *Asymmetric Sampling in Time (AST)* -mallin perusteella hitaampia taajuuksia esiintyy voimakkaammin oikealla aivopuoliskolla puheärsykkeiden ja muiden ääniärsykkeiden käsittelyn aikana. Kykytason osalta muun muassa heikompi delta- ja theeta-kaistojen rytmittyminen aivoissa ja poikkeava lateralisaatio on yhdistetty heikompaan suoritustasoon esimerkiksi fonologisessa prosessoinnissa. Kehityksen aikana hitaampien taajuuksien on todettu vähenevän aivoissa suhteessa nopeampiin taajuuksiin ja aivopuoliskojen on huomattu kypsyvän eri nopeuksilla.

Tähän tutkimukseen osallistui 53 henkilöä, joista 34 oli 4–9-vuotiaita lapsia ja 19 oli 20–28-vuotiaita aikuisia. Aivokuoren toimintaa puheen havainnoinnin tehtävän aikana mitattiin magneettiaivokäyrällä (MEG). Kuullun puheen akustisen verhoikäyrän ja MEG:n välille laskettiin koherenssiarvo kuvaamaan aivokuoren rytmittymisen voimakkuutta. Tutkimukseen kuului myös kognitiivisten taitojen kartoitus, jossa mitattiin osallistujien kielellisiä kykyjä laajasti käytetyin tutkimusmenetelmin, joihin kuului osioita seuraavista tutkimusmenetelmistä: NEPSY, NEPSY-II, WISC-IV, WAIS-IV, WPPSI-III ja RAN. Toistomittausten varianssianalyysin (ANOVA) perusteella oikealla aivopuoliskolla delta-taajuuden koherenssi oli voimakkaampaa, kun osallistuja kuunteli sanoja. Puolieroa ei tullut esille pidempien lauseärsykkeiden kuuntelun yhteydessä. Theeta-taajuuden koherenssin todettiin toistomittausten ANOVA:n perusteella olevan suhteellisesti voimakkaampaa aikuisilla sekä sanojen että lauseiden kuuntelun aikana. Kognitiivisten kielellisten kykyjen osalta ei löytynyt huomionarvoisia merkitseviä tuloksia. Tämän tutkimuksen tulokset eivät tukeneet AST-mallia. Rajoittavia tekijöitä olivat muun muassa pieni otoskoko, poikittaistutkimusasetelma ja menetelmälliset rajoitteet, mutta osaltaan eroja voi selittää erilaisten aivotutkimusmenetelmien ja ärsyketyyppien käyttö aiemmissä tutkimuksissa. Tulevaisuudessa olisi hyödyllistä pyrkiä yhtenäistämään tutkimuskenttää ja täsmentämään eroavien tutkimustulosten syitä. Tähän voisi auttaa esimerkiksi MEG:n ja aivosähkökäyrän (EEG) mittaaminen samanaikaisesti, lähdetason aivotoiminnan paikantaminen, eri ärsyketyyppien, kuten luonnollisen puheärsykkeen ja muiden äänien välisten erojen tutkiminen sekä laajojen pitkäaikaistutkimusten järjestäminen.

Avainsanat: puheen käsittely aivoissa, magnetoenkefalografia, delta-taajuus, theeta-taajuus, koherenssi, kielelliset kyvyt, *Asymmetric Sampling in Time (AST)*, kuuloaivokuori

## SISÄLLYS

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b> .....	<b>1</b>
1.1	Kieli ja puhe.....	1
1.2	Kieli aivoissa .....	1
1.3	Puheen havaitseminen kuulojärjestelmässä eri taajuuksilla .....	4
1.4	Puheen havaitsemisen kehitys .....	7
1.5	Magnetoenkefalografia puheen tutkimuksessa .....	9
1.6	Tutkimuskysymykset .....	9
<b>2</b>	<b>MENETELMÄT</b> .....	<b>10</b>
2.1	Tutkimuksen osallistujat .....	10
2.2	Tutkimuksen kulku .....	12
2.3	Kognitiivisten taitojen tutkimus .....	13
2.3.1	Kuvaukset kognitiivisista tehtävistä: lapset .....	13
2.3.2	Kuvaukset kognitiivisista tehtävistä: aikuiset.....	15
2.3.3	Kuvaukset kognitiivisista tehtävistä: kaikki tutkittavat .....	16
2.4	MEG-mittauksen kulku.....	17
2.5	Tutkimustehtävä .....	18
<b>3</b>	<b>AINEISTON ANALYYSI</b> .....	<b>19</b>
3.1	Esikäsittely .....	19
3.2	Koherenssianalyysi.....	20
3.3	Tilastollisen analyysin vaiheet ja muuttujien jakaumatarkastelut .....	20
<b>4</b>	<b>TULOKSET</b> .....	<b>21</b>
4.1	Toistomittausten varianssianalyysi.....	24
4.2	Korrelaatiokerrointen tarkastelu .....	25
<b>5</b>	<b>POHDINTA</b> .....	<b>26</b>
5.1	MEG ja EEG .....	27
5.2	Toistojen ja osallistujien määrä.....	28
5.3	Tutkimuksen arviointi .....	29
	<b>LÄHTEET</b> .....	<b>31</b>

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Kieli ja puhe

Puhe on ihmiselle tärkeä tapa siirtää tietoa yksilöltä toiselle. Puhe luo pohjan symboliselle ajattelulle, kielelle, kirjoitustaidolle ja inhimilliselle kulttuurille (Aaltonen, 2006). Tämän tutkimuksen kannalta keskeisintä on, miten puhetta havaitaan ihmisaivoissa. Kuten Giraud ja Poeppel (2012b, 225) mainitsevat, puheen havainnoinnissa korviin saapuvat mekaaniset värähtelyt muunnetaan aivoissa abstrakteiksi kielellisiksi edustuksiksi, kuten sanoiksi. Puheen havainnoinnissa akustinen signaali muutetaan mielensisäisiksi edustuksiksi. Kielellinen ymmärtäminen ei rajoitu pelkästään puheen havainnointiin, vaan kielellistä tietoa voidaan välittää kuuloaistin lisäksi myös näköaistin (lukeminen, viittomakieli, huulilталuku) tai kosketuksen (pistekirjoitus) avulla. Nämä kielellisen ymmärtämisen osa-alueet jätetään kuitenkin tämän tutkimuksen ulkopuolelle. Puheen havainnointi kehittyy yksilön elämän aikana, mutta ilmiötä on tutkittu laajemmin pääasiassa aikuisilla. Tässä tutkimuksessa pyritäänkin saamaan uutta tietoa siitä, miten puheen havainnoinnin aivomekanismit toimivat eri ikäisillä ihmisillä ja voidaananko yhteyksiä aivotason mittareiden ja kielellisten kognitiivisten kykyjen mittareiden välillä havaita.

## 1.2 Kieli aivoissa

Kielen aivoperustan klassinen malli paikallistaa kielelliset toiminnot vasempaan aivopuoliskoon ja tämän mallin mukainen ajattelu värittää edelleen voimakkaasti kielen aivotoimintojen opetusta, tutkimusta ja hoitoa useilla eri tieteenaloilla. Uudemman tutkimuksen mukaan kielellisten toimintojen on kuitenkin havaittu tapahtuvan aivoissa molemminpuolisesti eli bilateraalisesti. Tässä luvussa esitellään puheen aivotoimintojen paikantumista klassisen mallin ja uudempiin tutkimuksiin perustuvien mallien perusteella.

Toiminnallisten hankaluuksien ja aivovaurioiden yhteyksien tutkiminen on ollut aivotutkimuksen varhaisesta historiasta lähtien merkittävä tapa saada tietoa aivojen toiminnasta. Vuonna 1861 Paul Broca (1861) yhdisti potilaillaan havaitsemansa puheen tuottamisen vaikeudet aivojen vasemman-

puoleisen temporaalilohkon vaurioihin. Hieman myöhemmin Carl Wernicke (1874) liitti omien potilaidensa vasemman ohimolohkon aivovammat puheen ymmärtämisen hankaluuksiin. Brocan ja Wernicken tutkimukset ovat keskeisiä neurotieteen historian kulmakiviä ja ne ovat luoneet pohjaa mallille, jota kutsun tässä tekstissä Poeppelin ja kumppanien (2012) ilmaisun mukaan kielen aivoperustan klassiseksi malliksi.

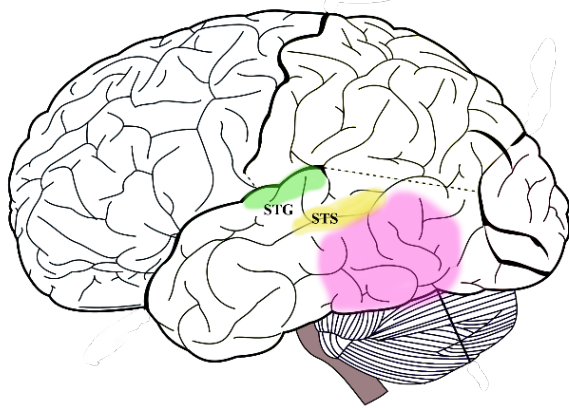
Kuten Purves ja kumppanit (2019, 706–709) tuovat esille, Brocan alueen (Brodmannin alueet 44 ja 45) vauriot yhdistetään nykyäänkin puheen tuoton häiriöön, jota kutsutaan Brocan afasiaksi tai eri afasialuokitusten mukaan motoriseksi tai ekspressiiviseksi afasiaksi. Wernicken alue (Brodmannin alue 22) taas liitetään puheen ymmärtämisen hankaluuteen ja Wernicken afasiaan, jota kutsutaan myös sensoriseksi tai reseptiiviseksi afasiaksi. Purvesin ja kumppanien teoksessa esitetään myös klassiseen malliin kuuluva kolmas afasiatyyppi, konduktioafasia, jossa kyky tuottaa sopiva puhevaste kuultuun kommunikatioon heikkenee. Konduktioafasia yhdistetään vasemman etuotsalohkon ja ohimolohkon välisten yhteyksien heikkenemiseen, esimerkiksi Brocan alueen ja Wernicken alueen yhdistävän *arcuate fasciculuksen* vaurioitumisen takia. Yllä mainittuja afasiamuotoja ei välttämättä aina tarkastella tiukasti yhteydessä aivovaurion sijantiin, vaan niitä saatetaan tutkia myös ilmenevän oirekuvan perusteella.

Kuten Poeppel ja kumppanit (2012, 14125) huomauttavat, klassisen mallin ja nykyisen näemyksen väliin mahtuu yli sata vuotta tutkimusta, joiden aikana kielen tutkimuksen tarkkuus on lisääntynyt. Sekä ilmiöiden käsitteellinen määrittely että aivotutkimusmenetelmien resoluutio on parantunut. Aivokuvantamisteknologia on edistynyt joko kuolemanjälkeisestä tai invasiivisesta aivokudoksen tutkimuksesta noninvasiiviseen toiminnalliseen aivokuvantamiseen. Nykyaikaisilla aivokuvantamismenetelmillä saadaan aiempaa tarkempaa tietoa aivojen toiminnasta niin ajallisen kuin paikallisenkin tarkkuuden osalta. Myös tutkittavien ilmiöiden käsitteellinen määrittely on kehittynyt ja nykyään neurotiede yhdistetään myös teoriapohjaltaan edistyneisiin kielen tutkimuksen aloihin, kuten lingvistiikkaan, kognitiiviseen psykologiaan ja laskennallisiin malleihin. Poeppel ja kumppanit (2012, 14126) nostavat esille, että esimerkiksi kuva Brocan alueella tapahtuvista aivotoiminnoista on tarkentunut.

David Poeppel (2003) esittelee *Asymmetric Sampling in Time (AST)* -mallin, jonka mukaan puheen käsittely ei rajoitu pelkästään vasempaan aivopuoliskoon, vaan käsittely tapahtuu samanaikaisesti sekä vasemmalla että oikealla kuuloaivokuorella. Tosin mallin mukaan käsittely on asymmetristä niin, että vasen puoli käsittelee puheärsyettä lyhyemmissä aikaikkunoissa, kun taas oikealla puolella käsitellään samanaikaisesti tietoa pidemmissä ajanjaksoissa. Malli pohjautuu erityisesti neljään keskeiseen havaintoon. Ensimmäisen havainnon mukaan puheen sisältämä tieto asettuu samanaikaisesti useille eri aikaskaaloille, joilla lyhyet ja hitaat muutokset limittyvät yhteen. Toisaalta myös

psykofysiologiaan pohjautuva tutkimus viittaa siihen, että ajallisesti järjestäytyntä tietoa käsitellään eri aistijärjestelmissä jaksottaisesti jakamalla sitä sopiviin integraatioaikaikkunoihin (*temporal integration windows*). Kolmas huomio liittyy siihen, että puhesignaalin prosessoinnin on havaittu tapahtuvan molemminpuolisesti aivokuoren ylemmillä ohimolohkoilla. Neljäntenä Poeppel nostaa esiin psykologisen ja aivokuvantamiseen perustuvan tutkimustiedon siitä, että vasemmanpuoleiset aivoraikenteet soveltuvat paremmin nopealla aikaskaalalla tapahtuvien ärsykkeiden havainnointiin. AST-mallia tarkennetaan luvussa 1.3.

Gregory Hickokin ja David Poeppelin (2007) esittelemä kahden reitin malli (*dual-stream model*) puheen käsittelyn molemminpuolisuudesta aivoissa kuvaa puheärsyksen käsittelyn toiminnallista neuroanatomiaa. Mallissa on omat reittinsä sekä puheen ymmärtämiselle että puheen tuotolle. Näiden reittien ajatellaan olevan rinnakkaisia niin, että äänen prosessointia voi tapahtua molemmilla aivopuoliskoilla samanaikaisesti. Voimakkaasti vasemmalle painottunut dorsaalinen reitti (*dorsal stream*) on tärkeä puheen tuotossa, koska sen kautta auditorinen ja motorinen tieto yhdistyvät, jolloin akustinen signaali voidaan muuttaa artikulatorisiksi edustuksiksi, joita tarvitaan puheen tuotossa. Tämän tutkimuksen kysymysten kannalta keskeistä ventraalista reittiä (*ventral stream*) pitkin kuultu signaali muuttuu merkitykselliseksi käsitteiksi ja semanttisiksi edustuksiksi. Tämä reitti on molemminpuolisesti eli bilateraalaisesti järjestäytynyt. Ventraalisen reitin toiminta tapahtuu samanaikaisesti kahdella eri aikaskaalalla ja eri pituisia puheen piirteitä käsitellään rinnakkaisina prosesseina, eikä hierarkkisesti lyhyemmistä piirteistä suurempiin kokonaisuuksiin edeten. Reittiin kuuluu useita ohimolohkon alueella sijaitsevan kuuloaivokuoren alueita, joista tämän tutkimuksen kannalta keskeiset on merkitty kuvaan 1. Ylempi temporaalipoimu (*superior temporal gyrus, STG*) liitetään aikaspektrianalyysiin ja sen toiminta on molemminpuolista. Fonologiseen prosessointiin liitetyn ylempään temporaaliuurteen (*superior temporal sulcus, STS*) aktiivisuus painottuu lievästi vasemmalle puolelle. Sen alla ventraalisesti sijaitsevat taaempi keskitemporaalipoimu (*posterior middle temporal gyrus, pMTG*) ja taaempi alatemporaalipoimu (*posterior inferior temporal gyrus, pITS*) on yhdistetty leksi-kaalisen tason toimintoihin, joissa fonologinen ja semanttinen tieto yhdistyvät. Ventraaliseen reittiin kuuluu myös edellä mainittuihin alueisiin anteriorisesti sijaitsevia alueita, joiden toiminnan epäillään liittyvän syntaktisen ja semanttisen tiedon yhdistelyyn. Näillä alueilla on myös tärkeä verkostoa yhdistävä rooli.



KUVA 1. Kahden reitin mallin ventraalisen reitin alueita, jotka liittyvät puheen käsittelyyn. Vihreällä merkitty dorsaalinen alue ylemmällä temporaalipoimulla (STG) käsittelee aikaspektritietoa ja keltaisella merkitty ylemmän temporaalivuorteen (STS) alue liittyy fonologiseen prosessointiin. Vaaleanpunaisella merkitylle alueelle sijoittuvat taaemman keskitemporaalipoimun (pMTG) ja taaemman alitemporaalipoimun (pITS) alueet, jotka liittyvät leksikaalisen tiedon prosessointiin. Nämä alueet toimivat yhteydessä toisiinsa ja molemmilla aivopuoliskoilla. Kuva: Ainomaija Laitinen mukailen Mysid, 2008 ja Hickok ja Poeppel, 2007

### 1.3 Puheen havaitseminen kuulojärjestelmässä eri taajuuksilla

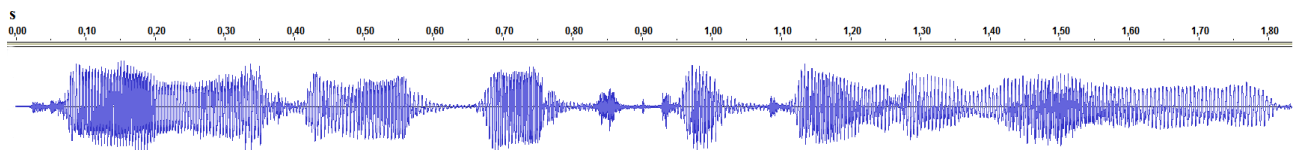
Puhe on ajallisesti rakentuva signaali, minkä takia puheen havainnointia aivoissa tulee tutkia myös ajallisesti tarkasti. Hermostollinen herkkyys ja puheen eri taajuuksilla tapahtuvat ilmiöt rytmittyvät ajallisesti yhteen niin, että aivokuori pystyy pakkaamaan tietoa jatkokäsittelyä varten. Tässä luvussa esitellään AST-mallin pohjalta puheesta havaittavia taajuuksia ja sitä, miten ne painottuvat eri aivopuoliskoille. Lopuksi perustellaan tässä tutkimuksessa tarkempaan käsittelyyn valitut taajuudet.

AST-mallissa kuuloaivokuoren oskillaatiot toimivat pohjana auditiiviselle puheen käsittelylle, koska ne niin sanotusti pakkaavat äänitietoa sopiviksi ajallisiksi yksiköiksi, kuten Anne-Lise Giraud ja David Poeppel (2012a) kuvailevat. Oskillaatiot, jotka esiintyvät laaja-alaisesti ja sisäsyntyisesti aivoissa, syntyvät hermosolujoukkojen rytmisestä toiminnasta. Aivoista tunnetaan useita erilaisia oskillaatiotaajuuksikaistoja, jotka liitetään useisiin erilaisiin toimintajärjestelmiin, esimerkiksi eri aisti-modaliteeteissa. Keskeisiä taajuuksikaistoja kuuloaivokuorella ovat matala gamma-taajuus (25–35 Hz), theeta-taajuus (4–8 Hz) ja delta-taajuus (1–3 Hz) (TAULUKKO 1). Yllä luetellut taajuuksikaistat vastaavat luonnollisessa puhevirrassa esiintyviä äänen taajuuksikaistoja. Muutokset foneemitasolla ovat melko lyhytkestoisia puheen piirteitä. Niihin kuuluvat muun muassa foneemiset muutokset kuten /ba:/n ja /da:/n välinen ero ja soinnillisuus, esimerkiksi /ba:/n ero /pa:/han. Nämä muutokset tapahtuvat noin 30–50 hertsin taajuudella, joka on lähellä gamma-taajuuksikaistaa. Puheen akustinen verhoikäyrä ja tavurytmi sijoittuvat noin 4–7 hertsin taajuudelle, joka vastaa theeta-taajuuksikaistaa. Kuvassa

2 esitellään puheen aaltomuoto. Puheen hitaammat muutokset, kuten lausekkeiden ja intonaatioiden vaihtelu, tapahtuvat noin 1–2 hertsin taajuudella, mikä vastaa delta-taajuuskaistaa.

TAULUKKO 1. Kuuloaivokuorella esiintyvät taajuuskaistat ja niitä vastaavat puheen piirteet

Taajuuskaistan nimi	Taajuus hertseinä	Vastaavat puheen piirteet
gamma	25–35	foneemiset muutokset, soinnillisuus
theeta	4–8	puheen verhokäyrä, tavurytmi
delta	1–3	leksikaaliset yksiköt, lausekkeet, intonaatioiden vaihtelu



KUVA 2. Lauseen ”Kani on pitkäkorvainen” aaltomuoto. Aaltomuodon vaihtelu liittyy konsonantti-vokaalirakenteeseen ja tavurakenteeseen, jossa painotetut ja painottamattomat tavut vaihtelevat

Ensimmäinen tutkimus (Luo & Poeppel, 2007), jossa aivot toiminnan taajuuksien rytmittyminen puheen verhokäyrään havaittiin, yhdisti theeta-taajuuden myös puheen ymmärrettävyyteen. Mitä vaikeammin ymmärrettävä käytetty lauseärsyke oli, sitä heikommin theeta-aktiivisuus rytmittyi verhokäyrään. Luo, Liu ja Poeppel (2010) yhdistivät verhokäyrän seuraamisen tarkkuuden myös audiovisuaaliseen puheärsykkeeseen käsittelyyn. Myöhemmässä tutkimuksessa (Luo & Poeppel, 2012) huomattiin, että kuuloaivokuoren toiminta seurasi samalla tavalla korreloiden myös ääniärsykettä, joka ei ollut puhetta, mutta joka oli muokattu sisältämään puheelle ominaisia taajuuskaistoja, eli gamma- ja theeta-taajuuksilla vaihtelevaa ääntä.

Giraudin ja Poeppelin (2012a) kuvaileman mallin mukaan sisäsyntyiset kuuloaivokuoren oskillaatiot ja kuuloärsykkeeseen aiheuttamat hermosolujen vasteet ärsykkeeseen vuorovaikuttavat toisiinsa tietyillä taajuuskaistoilla. Myös lepotilassa esiintyy aktiivisuutta theeta- ja delta-taajuuskaistoilla. Kun puhesignaali saavuttaa aivokuoren, theeta-kaista rytmittyy yhteen puheen verhokäyrän kanssa. Theeta-kaistan amplitudin vaihe ikään kuin käynnistyy (*phase resetting*) puheärsykkeen ilmetessä ja kaistan aktiivisuus seurailee puheen tavurytmiä. Gamma-taajuus taas liittyy amplitudiltaan ja mahdollisesti myös vaiheeltaan theeta-taajuuteen, vaikka ei ole varmaa, aiheutuuko gamman liittymisen suoraan puheärsykkeestä vai käynnistääkö theeta-rytmi sen. Näin taajuuskaistat jakavat kuuloärsykkeen ajallisesti pienempiin osiin jatkokäsittelyä varten ja luovat aikaikkunoita, joihin hermosolujen herkkyys kasvaa hetkellisesti. Tämä on otollista juuri tiettyjen puheen piirteiden havainnointiin. Beta-



taajuuskaista, joka jää 15–20 hertsin taajuudella theeta- ja gamma-taajuuksien väliin, ei ilmenny voimakkaasti kuuloaivokuorella. Tämä voi auttaa kahden toisistaan erillisen, mutta toisiinsa tietyssä ajallisessa suhteessa tapahtuvan kaistan samanaikaista käsittelyä. Yhden theeta-syklin sisään mahtuu noin neljä gamma-sykliä. Vielä ei tiedetä, limittyvätkö oskillaatiot samalla tavalla myös nopeutetun puheen kuuntelussa ja mitä tapahtuu, kun limittyminen ei pysy ärsykkeen perässä.

Giraudin ja Poeppelin (2012b) mukaan taajuuskaistoja hyödynnetään asymmetrisesti painotuen eripuoleisilla kuuloaivokuorilla, mikä sopii yhteen anatomisten solutason havaintojen kanssa. Gamma-taajuudella tapahtuvan tiedonkäsittelyn on huomattu olevan vasemmanpuoleisesti painottuvaa, kun taas theeta-taajuuden osalta painotusta on huomattu oikealla auditiivisella ohimolohkolla. Theeta-kaistan oikeanpuoleista painotusta on havaittu sekä puheärsykkeen yhteydessä (Giraud & Poeppel, 2012b; Abrams ym., 2008) että tutkimuksissa, joissa ei ole käytetty puheärsykettä vaan ääniärsykeitä, jotka sisältävät vaihtelua gamma- ja theeta-taajuuskaistoilla (Luo & Poeppel, 2012).

Kuten Giraud ja Poeppel (2012b) mainitsevat, sekä nopeita että hitaita taajuuskaistoja esiintyy kuitenkin jossain määrin molemmilla kuuloaivokuoren puoliskoilla. Vasemmalla kuuloaivokuorella on enemmän suurikokoisia pyramidisoluja, jotka soveltuvat erityisesti nopeaan toimintaan. Suurilla soluilla on yleisesti parempi sähkönsiirtokyky suuremman pinta-alan vuoksi, mikä nopeuttaa solun laukeamista uudelleen edellisen laukeamisen jälkeen. Oikealta kuuloaivokuorelta on taas löydetty suhteessa enemmän pienempiä pyramidisoluja, jotka ovat asettautuneet tiheämpiin pylväsmuodostelmiin. Ne sopivat rakenteeltaan hitaamman ärsykkeen seuraamiseen. Theetan lisäksi myös delta-taajuuskaistan aktiivisuuden on huomattu painottuvan kielellisen prosessoinnin aikana oikealle kuuloaivokuorelle. On mahdollista, että theetan asemesta nimenomaan delta-rytmin oikeanpuoleinen painotus on ensisijaista, kun taas gamma ja theeta esiintyvät yhdessä limittyen vasemmalla aivopuoliskolla.

Puheen havainnoinnin tutkimuksessa on aiemmin usein käytetty ärsykkeinä yksittäisiä puheäänteitä, tavuja tai sanoja (Giraud & Poeppel 2012b, 226). Luonnollinen puhe tapahtuu kuitenkin yleensä osana jatkuvaa puhevirtaa, joka koostuu ajallisesti pidemmistä yksiköistä eli lauseista. Luonnollisemman ympäristön näkökulmasta myös lausetason puheen havainnoinnin tutkimus on siis tärkeää. Tässä tutkielmassa on haluttu keskittyä sanatason ja lausetason piirteisiin ja siksi käsittelyyn on valittu theeta- ja delta-taajuudet. Gamma-taajuudet on tässä tarkastelussa päätetty jättää ulkopuolelle tutkimuskysymyksen laajuuden rajaamisen ja käytännön syiden vuoksi. Gamma-taajuuden tutkimuksessa noninvasiivisin menetelmin on menetelmällisiä haasteita, koska se on taajuusanalyysissä herkkä kohinalle. Kuten Whitham ja kumppanit toteavat (2007), yli 20 hertsin taajuudella värähtelevä gamma sekoittuu helposti ei-aivoperäisistä lähteistä tulevaan lihasaktiivisuuteen, koska lihasten toiminta aiheuttaa korkeataajuuksista aktiivisuutta, joka näkyy EEG- ja MEG-mittauksissa. Myös pienet

liikkeet saattavat luoda gammamaisen mittaustuloksen, kuten esimerkiksi silmänliikkeiden alussa tapahtuva ekstraokulaaristen lihasten nopea toiminta (Luck 2014, 202). Gamma-rytmiä voi tutkia luotettavammin invasiivisissa kallonsisäisissä mittauksissa suoraan aivokuorelta, mutta eettisistä ja käytännön syistä näitä mittauksia tehdään vain epilepsialeikkausten yhteydessä (Whitham ym., 2007). Gamma-taajuuksia on tutkittu tarkemmin invasiivisissa eläinmittauksissa (Buzsáki & Wang 2012). Aiemmassa tutkimuksessa on myös saatu viitteitä, että gamma-taajuudella tapahtuvat muutokset saattavat olla hitaita taajuuksia bilateralisempia (Hickok & Poeppel, 2007, 396–397; Luo & Poeppel, 2012). Tässä tutkimuksessa haluttiin keskittyä tutkimaan mahdollisia esiin nousevia eroja aivopuoliskojen välillä.

## 1.4 Puheen havaitsemisen kehitys

Puheen havainnoinnissa hyödynnettäviä taajuuskaistoja on tutkittu pääosin aikuisilla. Aivojen kypsymisestä lapsuudessa erityisesti puheen rytmittämien taajuuskaistojen näkökulmasta on vähemmän tietoa. Tässä luvussa muutokset aivotoiminnan taajuuksien suhteellisissa voimakkuuksissa sekä asymmetria kuuloaivokuoren prosessoinnissa yhdistetään kehityksen ja kykytason näkökulmaan.

Usha Goswami (2011) yhdistää aivo-oskillaatiomalliin kehityksellisen näkökulman. Aikaotantamallin (*temporal sampling framework, TSF*) mukaan hermostotason hankaluudet puheen nousuaikojen havaitsemisessa sekä delta- ja theeta-taajuuskaistoihin mukautumisessa aiheuttavat hankaluuksia tavujen, tavupainojen ja prosodian havainnoinnissa. Goswami yhdistää tämän kausaalisen mallin lukivaikeuteen, kuitenkin todeten, että malli voi olla myös puheen kehityksen hankaluuksien tai yksilökohtaisten kielellisten kykyjen erojen taustalla. Myös poikkeava aivotoimintojen lateralisaatio puhesignaalin käsittelyssä on liitetty heikompaan fonologiseen taitotasoon, mikä voi liittyä yllä esitellyn ventraalisen reitin poikkeavaan toimintaan. Tavujen, tavupainojen ja prosodian havainnointia on tutkittu sekä aikuisilla että lapsilla lukivaikeuden yhteydessä, mutta tietoa puheen havainnoinnista tavallisesti kehittyvillä lapsilla ja lapsilla, joilla on puheen kehityksen hankaluuksia, on melko vähän (Goswami, 2011).

Kielellisen prosessoinnin hankaluuden ja aivokuoren puheen verhokäyrän rytmittymisen yhteys on huomattu myös Abramisin ja kumppanien (2009) tutkimuksessa, jossa poikkeava lateralisaatio puheen verhokäyrän seuraamisessa yhdistettiin heikompaan lukutaitoon. Lukutehtävissä paremmin suoriutuneilla oikea aivopuolisko seurasi vahvemmin puheen verhokäyrää. Clunies-Rossin ja kump-

panien (2018) seurantatutkimuksessa huomattiin, että voimakkaampi vasemmanpuoleinen lateralisaatio nopeasti esitettyjen äänien yhteydessä seitsemänvuotiaana liittyi parempaan foneemiseen taitotasoon yhdeksänvuotiaana.

Eri taajuuskaistojen suhteelliset voimakkuudet aivoissa vaihtelevat iän myötä. Segalowitzin, Satesson ja Jethan (2010) katsausartikkelin mukaan lapsilla matalammat taajuudet, joiksi theeta- ja delta-taajuudet luetaan, ovat yleisesti voimakkaampia kuin aikuisilla. Nopeammat taajuudet, kuten alfa- ja beeta-taajuudet, taas lisääntyvät suhteellisesti aivoissa yksilön kehityksen aikana edeten taajimmisilta aivokuoren alueilta kohti otsalohkoja.

Theeta-taajuuskaistan aktiivisuuden väheneminen lapsen kasvun aikana on havaittu jo vertailtaessa kolmen kuukauden ikäisiä vauvoja puolivuotiaisiin (Telkemeyer ym., 2011). Muutos taajuuksien voimakkuuksissa ja esiintymispaikoissa voi olla seurausta fysiologisista muutoksista kuten hermosolujen viejähaarakeiden myelinisaation lisääntymisestä, mikä tehostaa solujen toimintaa tai harmaan aineen hermosolujen synapsien karsiutumista, minkä myötä määrällisesti pienempi joukko soluja rytmittyy ärsykkeeseen (Whitford ym., 2007; Gómez ym., 2017).

Kehityksellisestä elementistä kertovat myös erot eri aivopuoliskojen painotuksissa eri ikäisillä. Giraud ja Poeppel (2012a, 514–515) esittelevät tuloksia, joiden mukaan gamma-taajuuskaistan aktiivisuus on vasemmalle painottunutta ja theeta-taajuuskaista luonnostaan oikealle painottunutta aikuisilla myös lepotilassa. Pienillä lapsilla vastaava puoliero tulee esille kuuloärsykkeen käsittelyn aikana.

Vasemman ja oikean kuuloaivokuoren kehityksellisessä kypsymisnopeudessa vaikuttaisi olevan eroja eri ärsyketyyppien ja eri aivotoiminnan piirteiden yhteydessä. Pang ja Taylor (2000) toteivat vasemman kuuloaivokuoren herätevasteiden kehittyvän nopeammin varhaislapsuudesta aikuisuuteen sekä vasteena 2000 hertsin ääneen että yksittäiseen puheäänteeseen. Parviainen, Helenius ja Salmelin (2019) puolestaan huomasivat oikean aivopuoliskon herätevasteiden kehityksen olevan pidemmällä 7–8-vuotiaiden lasten ryhmässä, kun ärsykkeenä käytettiin vuoroin voimistuvaa ja hiljenevää 1000 hertsin ääntä. Hämäläinen, Ortiz-Mantilla ja Benasich (2019) havaitsivat oikean aivopuoliskon kypsyvän aiemmin vasteena delta-taajuuden rytmittymiseen, kun lapsille esitettiin nopeasti vaihtuvia äänipareja pitkittäistutkimuksessa, jossa tutkittavia mitattiin 6- ja 12-kuukauden ikäisinä. Aivopuoliskojen väliset erot auditiivisessa prosessoinnissa voivat osoittaa, että vasen ja oikea aivopuolisko kypsyvät eri nopeudella tai että erot voivat olla seurausta aivotoimintojen erikoistumisesta vasteena ärsykkeisiin.

## 1.5 Magnetoenkefalografia puheen tutkimuksessa

Puheen kuuntelun aikaisen aivotoiminnan tutkimisen menetelmäksi on tässä tutkielmassa valittu magnetoenkefalografia (MEG), eli magneettiaivokäyrä. Se on ajallisesti hyvin tarkka ja paikallisesti verrattain tarkka aivokuvantamismenetelmä. Tämän tutkimuksen kannalta molemmat näistä ominaisuuksista ovat tärkeitä, kuten myös MEG:n noninvasiivisuus ja miellyttävyys tutkittaville.

Riitta Harin ja Aina Pucen (2017) mukaan MEG:llä voidaan mitata magneettikenttiä, jotka syntyvät aivokuoren solujoukkojen toiminnasta. Hermosolujoukkojen synkroninen toiminta aiheuttaa postsynaptisia potentiaaleja (PSP), joista syntyy pään ulkopuolelle heikko noin 100–500 femtoteslan magneettikenttä. Magneettikenttien ominaisuuksien vuoksi pään ulkopuolella havaittava magneettikenttä syntyy pääasiassa aivokuoren uurteissa sijaitsevien pyramidisolujen toiminnasta. Tuon magneettikentän muutoksia voidaan mitata herkillä SQUID-sensoreilla millisekuntien tarkkuudella. Tämän tutkimuksen kannalta ajallinen tarkkuus on erittäin tärkeää, jotta ääniärsykkeen aiheuttamat nopeat aivotoiminnan muutokset voidaan mitata ja yhdistää puhesignaaliin.

MEG:n etuna on se, että sillä havaittavaan magneettikenttään ei synny häiriötä aivoja ympäröivistä kudoksista, kuten aivo-selkäydinnesteestä, aivokalvoista, kallosta ja päänahan ihosta. Myös aivojen syvistä osista alkunsa saavat aktivaation lähteet jäävät pään sisäisten magneettikenttien ominaisuuksien vuoksi hyvin pieneksi, eivätkä näin häiritse aivokuoren mittauksia. Esimerkiksi MEG:lle menetelmänä rinnakkaisella aivosähkökäyrällä (EEG) mitattavaan signaaliin syntyy häiriötä aivoja ympäröivistä kudoksista ja syvistä lähteistä. Lisäksi MEG:n etuja ovat myös sen noninvasiivisuus ja valmistelujen yksinkertaisuus. (Hari & Puce 2017, 7–12, 81–82.) Koska osa tutkimuksen koehenkilöistä oli lapsia, heitä olisi voinut olla vaikea motivoida edes lievästi epämiellyttävään tutkimukseen. Tutkittavan valmistelu MEG:tä varten on myös verrattain nopeaa, mikä oli tärkeää erityisesti lasten osallistumismotivaation säilyttämisen kannalta.

## 1.6 Tutkimuskysymykset

Kun ihmisaivoissa havaitaan puhetta, kuuloaivokuoren toiminta rytmittyy puhevirran mukaan. Rytmittymisen aikana kuuloaivokuorella luonnollisesti tapahtuvat oskillaatiot limittyvät seuraamaan puheen akustisia piirteitä gamma-, theta- ja delta-taajuuksilla (Giraud & Poeppel, 2012a; 2012b).

Näistä taajuuksista noninvasiivisilla tutkimusmenetelmillä tarkasteltaviksi sopivat parhaiten hitaamat theeta- ja delta-taajuudet, jotka vastaavat puheen verhokäyrää ja lausetason piirteitä (Whitham ym., 2007; Hickok & Poeppel, 2007; Giraud & Poeppel, 2012a; 2012b). Tässä tutkimuksessa kyseisten taajuuskaistojen tutkimukseen on käytetty MEG:tä. Theeta- ja delta-taajuuskaistojen rytmittyminen on voimakkaampaa aiemman tutkimuksen perusteella kuuloaivokuoren oikealla puolella kuin vasemmalla puolella, jolla taas nopeampia taajuuksia on havaittu voimakkaammin (Giraud & Poeppel, 2012a; 2012b). Hitaampien taajuuksien suhteellinen voimakkuus pienenee yleisesti yksilön kehityksen aikana (Segalowitz ym., 2010). Taajuuskaistojen voimakkuuteen liittyvät kehitykselliset muutokset saattavat kuitenkin tapahtua eri nopeudella eri aivopuoliskoilla (Pang & Taylor, 2000; Parviainen ym., 2019; Hämäläinen ym., 2019). Tämän tutkimuksen ensimmäisenä tutkimuskysymyksenä haluttiin selvittää, löytyykö eri aivopuoliskoilla eroja siinä, kuinka voimakkaasti ne seuraavat puheärsyettä delta- ja theeta-taajuuskaistoilla ja ovatko nämä puolierot erilaisia lapsilla ja aikuisilla. Aiemman tutkimuksen perusteella on viitteitä siitä, että heikompi aivotason delta- ja theeta-taajuuskaistoihin mukautuminen voi liittyä heikompaan kielelliseen taitotasoon, esimerkiksi fonologisen erottelun osalta (Goswami, 2011; Abrams ym., 2009; Clunies-Ross ym., 2018). Toisena tutkimuskysymyksenä haluttiinkin selvittää, löytyykö kielellisen kognitiivisen kykytason ja kuuloaivokuoren delta- ja theeta-taajuuksien seuraamisen voimakkuuden välillä yhteyksiä.

## **2 MENETELMÄT**

Tässä pro gradu tutkielmassa käytetään aineistoa, joka on kerätty osana Orsolya B. Kolozsvárin väitöstutkimusta, joka julkaistaan 2020. Tutkimusaineistoa kerättiin vuodesta 2017 vuoteen 2019. Tutkimus on osa Euroopan Unionin Horizon 2020:n rahoittamaa PredictAble-tutkimusyhteistyöhanketta, jonka tavoitteena on edistää kielen kehityksen ja kielellisten vaikeuksien tutkimusta Euroopassa.

### **2.1 Tutkimuksen osallistujat**

Tutkimukseen osallistui 47 keskisuomalaista lasta, joista 34 sisällytettiin tutkimukseen. Tutkimuksen ulkopuolelle rajattiin 13 lapsen MEG-aineisto esimerkiksi liikeartefaktan, mittaushäiriön tai ohjeiden

noudattamattomuuden vuoksi. Syyt kuvataan tarkemmin Orsolya B. Kolozsvárin väitöskirjassa (tulos 2020). Suurin osa tutkimukseen sisällytyistä lapsista oli 5–8-vuotiaita. Tutkimukseen otettiin myös yksi hieman alle viisivuotias lapsi ja kaksi juuri yhdeksän vuotta täyttäneitä lasta. Tutkimukseen osallistui myös 19 20–28-vuotiasta aikuista, jotka kaikki sisällytettiin tutkimukseen. Lapset kutsuttiin tutkimukseen Väestörekisterikeskuksesta saadun satunnaistetun otoksen perusteella. Otokseen valittuihin perheisiin lähetettiin kirje, jonka pohjalta huoltajilla oli mahdollisuus ottaa yhteyttä yliopistoon osallistuakseen tutkimukseen. Tutkimukseen valittiin lapsia, joilla on puheen kehityksen vaikeuksia sekä lapsia, joilla ei ole puheen kehityksen vaikeuksia. Tämän tutkielman asetelman rajaamiseksi käsittelyyn otettiin nyt aineistoa vain lapsilta, joilla ei ole puheen kehityksen vaikeuksia. Aikuiset osallistujat kutsuttiin tutkimukseen valittujen opiskelijajärjestöjen sähköpostilistalle lähetetyillä ja yliopiston alueelle ripustetuilla mainoksilla. Tutkimukseen kutsuttiin aikuisten ryhmään vain henkilöitä, joilla ei ole ollut puheen kehityksen vaikeuksia.

Sekä lapsilla että aikuisilla tutkimuksen poissulkukriteerit olivat todettu lukivaikeus, lukivaikeusepäily tai lähisukulaisen lukivaikeus, tarkkaavaisuushäiriödiagnoosi- tai epäily, muut neurologiset häiriöt tai kaksikielisyys. Tällä tavoin tuloksia vääristäviä ulkopuolisia vaikutuksia pystyttiin vähentämään. Tutkimuksesta jätettiin pois myös henkilöt, joilla on metallia kehossaan (esimerkiksi hammasraudat), koska he eivät sovellu MEG- tai magneettiresonanssi (MRI)-mittauksiin metallin aiheuttaman magneettisen häiriön vuoksi.

Taustatietoja kartoitettiin osallistujille tai osallistujien huoltajille annettavalla kyselyllä. Lapsista 28 oli oikeakätisiä, 5 vasenkätisiä ja yksi molempikätinen. Aikuisista 18 oli oikeakätisiä ja yksi molempikätinen. Lapsista 16 oli tyttöjä ja 18 poikia, aikuisista naisia oli 17 ja miehiä 2. Kaikilla tutkimuksen osallistujilla oli normaali kuulo, joka lasten osalta tarkistettiin käyttämällä standardoitua audiometriä. Suurin osa lapsista kuuli 250–2000 hertsin välille sijoittuvilla taajuuksilla esitetyt äänet 25 desibelin voimakkuudella tai hiljaisempina. Osallistujilta kysyttiin MEG-mittauksen alussa, oliko tehtävässä käytetty äänen voimakkuus heille sopiva.

Tutkittavat ja tarvittaessa myös heidän huoltajansa antoivat kirjallisen suostumuksensa tutkimukseen. Tutkittavat saivat tutkimukseen osallistumisesta palkkioksi elokuva-lipun tai 10 euron lahjakortin ja lapset saivat tulosten MRI-kuvastaan. Tutkimuksesta koituvat matkakulut korvattiin tutkittaville ja tutkittavien huoltajille takautuvasti. Tutkimuksella on Jyväskylän eettisen toimikunnan puoltava lausunto.

## 2.2 Tutkimuksen kulku

Lasten osalta tutkimukseen kuului kolme mittausta, jotka järjestettiin kaikille tutkittaville seuraavassa järjestyksessä: kognitiivisten taitojen kartoitus, MEG-mittaus ja MRI-mittaus. Myös aikuiset tutkitavat kävivät kahdessa ensimmäisessä mittauksessa, mutta heille ei tehty MRI-kuvausta. Kaikki mitaukset tapahtuivat Jyväskylässä, kaksi edellä mainittua Jyväskylän yliopiston Psykologian laitoksen tiloissa ja viimeinen Synlab Suomi Oy:n toimipisteessä MRI-mittausta varten.

Kognitiivisia taitoja kartoitettiin yleisesti käytetyillä kognitiivisten taitojen tutkimusmenetelmillä. Menetelmien tarkemmat kuvaukset löytyvät luvuista 2.4 ja 2.5. Ensimmäisen mittaukskerran alussa tutkittava tai tutkittava ja hänen huoltajansa antoivat kirjallisen suostumuksensa jokaiseen tutkimuksen osaan. Tässä yhteydessä he saivat myös mahdollisuuden kysyä lisätietoja tutkimuksesta. Tutkittava teki kognitiivisten taitojen tehtävät ja kuulon mittauksen rauhallisessa tutkimushuoneessa, jossa oli tutkittavan lisäksi yksi tutkija. Huoltaja odotti mittaushuoneen ulkopuolella. Lapset pääsivät tutkimuskerran lopuksi harjoittelemaan viimeisen tutkimuskerran MRI-mittausta oikeaa MRI-mittauslaitetta muistuttavalla laitteella. Tämän tarkoituksena oli vähentää mittaustilanteeseen liittyvää jännitystä ja arvioida lapsen sopivuutta MRI-kuvaukseen.

Toisen tutkimuskerran MEG-mittaukset tehtiin Jyväskylän yliopiston tiloissa MEG-laboratoriossa. Tutkittavalle ja mahdolliselle huoltajalle esiteltiin laboratoriota, ja tutkittavaa pyydettiin istumaan hetki magneettisuojaahuoneessa MEG-mittauskypärän alla ennen varsinaisia valmisteluja. Tämä tehtiin sen vuoksi, että aivomagneettikäyrää voitiin tarkastella ja todeta näönvaraisesti, ettei hänen kehostaan tai vaatteistaan tule magneettista häiriötä mittaukseen. Tutkittavalle lainattiin tarvittaessa metallittomat vaatteet. Tutkittavan päähän ja kaulalle kiinnitettiin tutkimuksessa käytettävät anturit. Toinen tutkijoista oli magneettisuojaahuoneessa lapsitutkittavan seurana, jos tutkittava oli viisivuotias tai hän ei halunnut olla mittaushuoneessa yksin. MEG-mittauksessa tutkittavalle tehtiin lepotilamittaus ja lisäksi hän teki puheen havainnoinnin ja tuoton tehtävän (ks. tarkempi kuvaus luku 2.8), joka koostui harjoitusosiesta ja kolmesta samanpituisesta osiosta. Jos tutkittava oli lapsi, tutkijat kävivät magneettisuojaahuoneessa tutkittavan luona osioiden välissä. Huoltajat odottivat magneettisuojaahuoneen ulkopuolella mittausten ajan. He saivat käydä tutkittavan luona tehtävien välissä. Aikuisten tutkittavien kohdalla tutkittava sai itse päättää, halusiko hän pitää pidemmän tauon osioiden välillä vai jatkaa suoraan tehtävästä toiseen. MEG-mittauksen jälkeen tutkittavalle annettiin palkkio.

Kolmannella kerralla tutkimukseen osallistuva lapsi kävi huoltajansa kanssa MRI-mittauksessa Synlab Suomi Oy:n toimipisteessä, jossa Synlabin henkilökunta suoritti mittauksen. Tutkittavan ha-

lutessa huoltaja pääsi tutkittavan seuraksi mittaushuoneeseen. MRI-mittaus tehtiin aina MEG-mittauksen jälkeen, koska MRI-mittaus lisää henkilön aiheuttamaa magneettista häiriötä noin kolme päivää mittauksen jälkeen (Gross ym., 2013).

## **2.3 Kognitiivisten taitojen tutkimus**

Kielellisiä toimintoja mitattiin laajasti tutkimuskäytössä olevilla, luotettaviksi todetuilla käyttäytymistason tutkimusmenetelmillä, jotka kuvaillaan tarkemmin tulevissa kappaleissa. Tehtävät koostuivat kuullun, nähdyn tai luetun käsittelyyn painottuvista tehtävistä ja visuokonstruktiivisia kykyjä mittavasta tehtävästä. Tutkimuskysymysten mukaista tarkastelua varten mukaan valittiin kielellisiä taitoja vaativia kognitiivisten kykyjen mittareita. Visuokonstruktiota mittaava tehtävä ja työmuistitehtävä valittiin tarkasteluihin täydentämään kielellisillä mittareilla saatavia tuloksia ja toimimaan niiden vertailukohtana. Valittujen tehtävien osalta muuttujina käytettiin normitettuja pistemääriä (standardipistemäärät), raakapistemääriä tai tehtäväosiosta mitattuja suoritusajkoja. Kaikissa standardipistemäärämuuttujissa vaihteluväli on 1–19, mutta tehtäväkohtaiset raakapistemäärät tai suoritusajat vaihtelevat tehtävätyypin mukaan. Ne on mainittu kunkin tehtävän esittelyn yhteydessä.

### **2.3.1 Kuvaukset kognitiivisista tehtävistä: lapset**

NEPSY-testikokonaisuuden (Korkman, Kirk & Kemp 1997) merkityksettömien sanojen toiston tehtävä mittaa fonologista erottelua ja tuottamista. Tehtävässä lasta pyydetään toistamaan nauhoitteen perässä kuulemansa merkityksettömät sanat. Tehtävä on suunnattu 5–12-vuotiaille ja eri ikäisille on omat aloitusosionsa. Tehtävän pistemäärä on oikein toistettujen sanojen määrä. Sanoja on yhteensä 16. Tehtävä keskeytetään neljän peräkkäisen virheen jälkeen. Virheiksi ei lasketa itse korjattuja toistoja, väärän tavun painottamista, pysyviä artikulaatiovirheitä tai pientä tahdin hidastumista. Kuitenkin jos pysyviä artikulaatiovirheitä on monta, eikä tuloksen luotettavuutta voida arvioida, ei osiosta anneta pisteitä. Tilastollisissa käsittelyissä käytettiin tehtävästä laskettua iänmukaista standardipistemäärää.



Suun motoristen sarjojen tehtävällä (Korkman ym., 1997) mitataan suun motorista koordinaatiota puheartikulaation aikana. Tehtävässä lapsi toistaa kuulemiaan artikulatorisia sarjoja, jotka vaikeutuvat tehtävän edetessä. Tehtävä on kehitetty 3–12-vuotiaille ja eri ikäisille on omat aloitusosionsa. Tehtävässä lasketaan lapsen tuottamien oikeiden toistojen määrä. Maksimipistemäärä on 70. Systemaattisia äännevirheitä (kuten s- tai r-vika), rytmin hidastumista tai epäröintiä ei lasketa virheiksi. Tilastollisissa käsittelyissä käytettiin tehtävästä laskettua iänmukaista standardipistemäärää.

Äänneiden prosessointi -tehtävä on osa Korkmanin, Kirkin ja Kempin (2008a) kehittämää NEPSY-II -tutkimusmenetelmää. Se mittaa lapsen foneemista tietoisuutta ja fonologista prosessointia. Tehtävä vaikeutuu sen edetessä. Tehtävä on suunniteltu 3–16-vuotiaille niin, että eri ikäisille on omat aloitusosionsa. Ensimmäisessä osiossa lapsen täytyy tunnistaa sana, jonka hän kuulee vain tavuina tai osana sanasta. Toisessa osiossa sana tulee jakaa osiin, eli fonologisiin segmentteihin. Kolmannessa osassa lapsi muodostaa uuden sanan poistamalla tai korvaamalla äänneitä annetusta sanasta. Tehtävän kokonaispistemäärä lasketaan oikein ratkaistujen osioiden määränä, jokaisesta osiosta saa yhden pisteen. Maksimipistemäärä on 53. Tilastollisissa käsittelyissä käytettiin tehtävästä laskettua iänmukaista standardipistemäärää. Osatehtävän reliabiliteetti on hyvä (Cronbachin alfa = 0,963) (Korkman, Kirk ja Kemp 2008b).

NEPSY-II -tehtäväkokonaisuuden (Korkman ym. 2008a) lauseiden toiston tehtävässä arvioidaan lapsen kykyä palauttaa välittömästi mieleen lauseita, joiden pituus ja rakenne vaikeutuvat. Tehtävä on suunniteltu 3–6-vuotiaille lapsille. Tutkija lukee lauseen ääneen lapselle ja lapsi toistaa saman välittömästi perässä. Jos lapsi tekee yhden lauseen toistossa yli kaksi virhettä, pisteytetään suoritus nollassa. Jos virheitä, esimerkiksi sanojen muuntumisia, on vain kaksi tai yksi lauseesta saa yhden pisteen. Tehtävästä käytettiin tilastollisissa tarkasteluissa tehtävän raakapistemäärää, koska tehtävä tehtiin nyt myös suunniteltua testikäyttöä vanhemmille lapsille. Osatehtävän reliabiliteetti on hyvä (Cronbachin alfa = 0,903) (Korkman ym. 2008b).

Kuutiotehtävät -osatehtävä on konstruktivista päättelyä mittaava tehtävä, joka kuuluu Wechslerin ja kumppanien (2011a; 1995) kehittämiin WISC-IV ja WPPSI-III-tutkimusmenetelmäkokonaisuuksiin. Tehtävissä on pieniä eroja näiden testikokonaisuuksien välillä. Kuitenkin molemmissa osatesti mittaa lapsen näönvaraista spatiaalista hahmottamista ja ei-kielellistä käsitteenmuodostusta. Suoriutumiseen vaikuttaa myös lapsen visuaalinen havainnointikyky, visuomotorinen koordinaatio ja kyky ratkaista spatiaalisia pulmia loogisesti (Wechsler ym., 2011a, 125). WISC-IV:n konstruktivisen päättelyn tehtävässä tutkija esittää tutkittavalle kuvia, joiden perusteella tutkittavan tulee koota samanlainen kuvio hänelle annetuista kaksivärisistä kuutioista. Tehtävä on suunnattu 6–16-vuotiaille. Koottavat kuviot vaikeutuvat tehtävän edetessä. Pisteytyksessä otetaan huomioon tutkittavan tehtä-

vään käyttämä aika. Tehtävässä pisteytetään tietyn määräajan sisällä oikein suoritettut osiot. Vaikeammassa osiossa suorituksesta saa enemmän pisteitä nopeammalla suorituksella. Tehtävä katkaistaan kolmen peräkkäisen virheellisen osion tai ajan ylittäneen osion jälkeen. Osatestin reliabiliteetti on hyvä (Cronbachin alfa = 0,856) (Wechsler ym., 2011b). WPPSI-III:n kuutiotehtävissä alun osioissa käytetään vain yksivärisiä kuutioita, mutta tehtävän edetessä siirrytään käyttämään kaksivärisiä kuutioita. Muuten tehtävä muistuttaa esitystavaltaan, pisteytykseltään ja katkaisurajoiltaan WISC-IV:n vastaavaa tehtävää. Tämän tehtäväosion reliabiliteetti normiaineistossa on hyvä (Cronbachin alfa = 0,861). Tilastollisissa käsittelyissä käytettiin molempien kuutiotehtävien osalta tehtävistä laskettuja iänmukaisia standardipistemääriä, jotka yhdistettiin samaan muuttuun.

Tässä tutkimuksessa käytetty työmuistin numerosarjatehtävä on myös osa yllä mainittua WISC-IV-tutkimusmenetelmäkokonaisuutta (Wechsler ym., 2011a). Tehtävä mittaa kuulonvaraista lyhytkestoista muistia ja sarjallista prosessointia sekä tarkkaavuutta ja keskittymistä. Tutkittavaa pyydetään toistamaan kuulonvaraisesti numerosarjoja, joita tutkija esittää hänelle. Numerosarjat eteenpäin -osiossa tutkittavaa lasta pyydetään luettelemaan numerosarjaa samassa järjestyksessä, kuin tutkija on ne esittänyt, kun taas numerosarjat taaksepäin -osiossa numerot luetellaan päinvastaisessa järjestyksessä. Molemmissa osioissa numerosarjat pitenevät tehtävän edetessä. Tehtävän pistemäärä on kokonaan oikein lueteltujen numerosarjojen määrä. Maksimipistemäärä on 32. Keskeytys tehdään, kun yhden tehtäväosion molemmissa osioissa tulee virhe. Tilastollisissa käsittelyissä käytettiin tehtävästä laskettua iänmukaista standardipistemäärää. Osatehtävän reliabiliteetti on kohtalainen (Cronbachin alfa = 0,731) (Wechsler ym., 2011b).

### **2.3.2 Kuvaukset kognitiivisista tehtävistä: aikuiset**

Kuutiotehtävät -osatehtävä, joka on osa WAIS-IV -testikokonaisuutta (Wechsler ym., 2012a), on asettelmaltaan hyvin saman tyyppinen tehtävä kuin ylempänä kuvatut lasten kuutiotehtävät. Tehtävä mittaa muun muassa tutkittavan kykyä tehdä analyysia ja synteesiä abstraktien visuaalisten ärsykkeiden perusteella. Tutkija esittää kuvioita, jotka tutkittava kokoaa käyttäen kaksivärisiä kuutioita. Osioista saa pisteitä, kun sen kokoaa tietyn osiokohtaisen määräajan kuluessa. Kuviot vaikeutuvat tehtävän edetessä. Suoritus katkaistaan kahden peräkkäisen virheellisen osion tai ajan ylittäneen osion jälkeen. Vaikeammassa tehtäväosiossa saa enemmän pisteitä nopeasta suorituksesta. Tilastollisissa käsittelyissä käytettiin tehtävästä laskettua iänmukaista standardipistemäärää. Osion reliabiliteetti on kohtalainen (Cronbachin alfa = 0,71) (Wechsler ym., 2012b).

WAIS-IV:n (Wechsler ym., 2012a) numerosarjatehtävä on samantapainen kuin yllä kuvattu lapsille kehitetty menetelmä. Tehtävä on suunniteltu mittaamaan muun muassa kuulonvaraista ulkoa oppimista ja muistamista, työmuistia ja tiedon mielensisäistä käsittelyä. Tehtävän kaksi ensimmäistä osiota ovat samanlaisia kuin lasten numerosarjatehtävässä, eli numerosarjat eteenpäin ja numerosarjat taaksepäin. Aikuisten tehtävässä on tämän lisäksi myös kolmas osio, numerosarjat järjestyksessä, jossa tutkittavan tulee toistaa kuulemansa numerot numeroiden suuruusjärjestyksessä. Tehtävän kokonaispistemäärä on kokonaan oikein toistettujen numerosarjojen määrä. Tehtävä keskeytetään, kun yhden tehtäväosion molemmissa sarjoissa tulee virhe. Tilastollisissa käsittelyissä käytettiin tehtävästä laskettua iänmukaista standardipistemäärää. Menetelmän sisäinen luotettavuus on hyvä (Cronbachin alfa = 0,84) (Wechsler ym., 2012b).

### **2.3.3 Kuvaukset kognitiivisista tehtävistä: kaikki tutkittavat**

Ahosen, Tuovisen ja Leppäsaaren (2012) nopean sarjallisen nimeämisen tehtävistä (RAN, *Rapid Automated Naming*) tähän tutkimukseen valittiin Esineiden kuvat -osasarja ja Kirjaimet -osasarja. Tehtävät mittaavat automatisoitunutta sarjallista nimeämistä, johon vaaditaan nopeaa ja täsmällistä sanahakua muistista. Tehtävät on kehitetty 6–12-vuotiaille. Esineiden kuvat -osasarjassa tutkittavan eteen annetaan taulu, jossa on viisi kymmenen kuvan riviä. Tutkittavaa pyydetään nimeämään kuvat ääneen mahdollisimman nopeasti ja tarkasti. Kuvat on valittu niin, että ne edustavat suomen kielessä yleisiä käsitteitä. Käsitteitä kuvaavat sanat ovat lyhyitä ja helppoja ääntää. Kirjaimet -osasarjassa testitaulussa on viisi kymmenen kirjaimen riviä, jotka tutkittavan tulee luetella. Tutkittavaa pyydetään luettelemaan nopeasti kirjainten nimet, ei lukemaan niitä äänteinä tai yhdistelemällä vierekkäisiä kirjaimia. Tehtävään valitut kirjaimet ovat suomen kielessä yleisiä kirjaimia, jotka esitetään suuraakkosilla. Molemmissa osioissa tehtävän suoritus aika mitataan ja virheelliset nimeämiset ja poisjätöt lasketaan. Alle kuusivuotiaat lapset tekivät tässä tutkimuksessa vain Esineiden kuvat -osatestin. Vanhemmat lapset ja aikuiset tekivät molemmat valitut RAN-osiot. Koska aikuisille ei ole saatavilla standardipistemääriä tämän tehtävän osalta, tässä tutkimuksessa tarkasteltiin tehtävän suoritus aikoja sellaisenaan.

## 2.4 MEG-mittauksen kulku

MEG-mittaus tehtiin Jyväskylän yliopiston Monitieteisen aivotutkimuskeskuksen MEG-laboratoriossa, jossa on käytössä 306-kanavainen Elekta Neuromag TRIUX -MEG-laite (MEGIN Oy, Helsinki, Suomi). Mitattaessa käytettiin 0.03–300 hertsin suodatinta ja 1000 hertsin näytteenottotaajuutta. Mittauksen aikana pään paikannusta varten käytettiin viittä HPI (*Head Position Indicator*) -kelaa, joiden sijainnit ja tutkittavan pään keskeiset anatomiset maamerkit (preaurikulaariset pisteet, nasion) ja pään yleinen muoto tallennettiin Polhemus Isotrak -laitteella (Polhemus, Colchester, VT, Yhdysvallat).

Silmänliikkeitä mitattiin käyttämällä viittä silmänliike-elektrodia (EOG, *electro-oculogram*), jotka kiinnitettiin tutkittavien silmien viereen ja oikean silmän ylä- ja alapuolelle. Niiden näytteenottotaajuus oli 1000 hertsiä. Tutkittavan suun liikkeitä mitattiin asettamalla kertakäyttöiset elektrodit (EMG, *electromyogram*) huulten ylä- ja alapuolelle. Kielen liikkeisiin liittyvien lihasten sekä äänihuulten liikkeisiin liittyvää sähköistä toimintaa mitattiin asettamalla kaksi kertakäyttöistä elektrodia tutkittavan kaulalle. Elektrodien paikka määriteltiin asettamalla elektrodit alueille, joissa oli havaittavissa värinää tutkittavan puhuessa (KUVA 3). Elektrodien impedanssit mitattiin. Äänihuulten värähtelyä mitattiin puheen havainnoinnin ja tuoton tehtävän aikana myös kiihtyvyyssanturilla, joka asetettiin alemmas tutkittavan kaulalle alueelle, jossa oli havaittavissa värinää tutkittavan puhuessa.



KUVA 3. Tutkimuksessa käytettyjen elektrodien ja HPI-kelojen paikat. Viisi HPI-kelaa kiinnitettiin teipillä otsalle ja korvien taakse (kuvassa otsan kelat oranssilla). Viisi silmänliikkeitä mittaavaa elektrodia asetettiin seuraavasti: kaksi oikean silmän ylä- ja alapuolelle (siniset), kaksi kummankin silmän viereen (vihreät) ja referenssielektrodi solisluun päälle (musta). Kertakäyttöiset elektrodit asetettiin huulten yläpuolelle ja alapuolelle ja kaulalle rinnakkain (vaaleanpunaiset). Kuva: Ainomaija Laitinen

## 2.5 Tutkimustehtävä

MEG-mittauksen aikana osallistujille esitettiin puheen havainnoinnin ja tuoton tehtävä, jossa heitä pyydettiin toistamaan kuulemiaan tavuja, sanoja ja lauseita. Tehtävä esitettiin kuulokkeiden kautta ja heijastamalla ruudulle. Tutkimustehtävä kuvailtiin lapsille leikkinä, jossa heidän tuli opettaa papukaijoja puhumaan. Lapsille esitettiin 18 toistoa tavuista /ka/, /pa/ ja /ta/, joiden lisäksi he kuulivat samoilla tavuilla alkavia sanoja ja lauseita, jotka sisälsivät näitä kuultuja sanoja. Kutakin tavua kohden esitettiin 18 eri sanaa ja jokainen kuulluista sanoista esiintyi yhdessä lauseessa. Kokeessa oli harjoitusosio ja kolme varsinaista koeosioita. Mittauksessa oli yhteensä 54 toistoa kutakin ärsyketyyppiä (tavut, sanat ja lauseet). Tutkittavia ohjeistettiin katsomaan näytölle heijastettua fiksaatiopistettä (rasti) ja toistamaan kuulemansa tavu, sana tai lause, kun ruudulle ilmestyi 750 millisekunnin viiveen jälkeen papukaijan kuva. Ääni nauhoitettiin mikrofonilla, jonka näytteenottotaajuus oli 44.1 kilohertsiä. Tutkittavien annettiin pitää kussakin mittauksen osiossa kaksi taukoa, joiden pituuden he saivat päättää itse jatkamalla tehtävää napin painalluksella. Tehtävän kulku on esitetty kuvassa 4.



KUVA 4. Tutkimustehtävän esitysjärjestys. Kaiutin-symboli kuvaa kuulokkeista kuultua tavua, sanaa tai lausetta. Kuva: Orsolya B. Kolozsvári

## 3 AINEISTON ANALYYSI

### 3.1 Esikäsittely

MEG-aineisto esikäsiteltiin MaxFilter 2.2.15 –ohjelmistolla (MEGIN Oy), jotta aivojen ulkopuolisten häiriölähteiden ja kohinan vaikutusta saataisiin pienennettyä. Käsitteilyyn käytettiin SSS-menetelmän (*signal space separation*) ajallista laajennusta, tSSS:ää (*spatiotemporal signal space separation*) (Taulu, Simola & Kajola 2005), joka ottaa huomioon myös ajalliset muutokset. Koska samaa aineistoa käytettiin myös puhetta sisältävien osioiden analysointiin, tSSS-korrelaatorajaksi asetettiin 0,9, joka sallii hieman oletusarvoa 0,98 enemmän häiriötä. Ohjelman *autobad*-toimintoa käytettiin selkeästi huonojen kanavien poistamiseen ja pään liikkeiden vaikutuksen kompensoimiseksi käytettiin *movement correction* -toimintoa. Jokaisen koehenkilön aineisto tallennettiin kolmessa osassa. Pään sijainniksi analyyseissa määriteltiin kunkin henkilön tutkimuksen alun, eli ensimmäisen aineiston osan tai ensimmäisen tehtävän alun pään sijainti.

Esikäsittelyä jatkettiin käyttäen MNE-Python-ohjelmistoa ja MATLAB R2016b -ohjelmiston (The MathWorks Inc., Natick, MA, 2000) FieldTrip -laajennusta (ladattu 20.10.2016; Oostenveld ym., 2011). Jokaisen koehenkilön aineisto yhdistettiin kolmesta osasta yhdeksi tiedostoksi, minkä jälkeen aineistosta poistettiin häiriötekijöitä riippumattomien komponenttien analyysin avulla (*Independent Component Analysis, ICA*) MNE-Python-ohjelmistossa. Poistettaviksi häiriökomponenteiksi valittiin visuaalisen tarkastelun avulla silmänliikkeet, sydämensyke ja selkeästi aivotoimintaan kuulumattomat artefaktat. Visuaalisessa tarkastelussa otettiin huomioon komponentin muoto ja mille alueelle komponentin aktiivisuus keskittyi topografisesti. Lopuksi visuaalisen tarkastelun perusteella kolme lapsikoehenkilöä, joiden aineistossa oli useita häiriöisiä kanavia, poistettiin jatkokäsittelyistä.

Loput aineistonkäsittelyn vaiheet tehtiin FieldTripissä. Koherenssianalyysia varten jatkuva MEG-aineisto jaettiin osiin, joihin valittiin ajanjaksot niin, että jokainen osa alkoi 100 millisekuntia ennen ääniärsyksen alkua ja loppui 100 millisekuntia ääniärsyksen eli sanan tai lauseen lopun jälkeen. Aineisto suodatettiin 1–45 hertsin läpikäyttösuodattimella. Osien perustasoksi (*baseline*) asetettiin ajankohdan 100 millisekuntia ennen äänen alkua oleva taso. Ääniärsyksen näytteenottoaajuus laskettiin vastaamaan MEG-aineiston näytteenottotaajuutta 1000 hertsiin. Seuraavaksi ääniärsykkeelle laskettiin MATLAB-ohjelmalla Hilbert-muunnoksen avulla verhokäyrä, joka lisättiin MEG-aineistoon 307. kanavaksi.

## 3.2 Koherenssianalyysi

Ennen delta- ja theeta-taajuuksien koherenssianalyysia kunkin osion alusta 350 millisekuntia muutettiin nollassi, koska ääniärsykkeen aiheuttaman herätevasteen ei haluttu vaikuttavan lopulliseen koherenssilaskelmaan. Ääniärsykkeen ja aivokuoren aktivaation välistä koherenssia tutkittiin laskemalla ääniärsykkeen verhoikäyrän ja MEG-aineistosta saatujen ärsykekohtaisten osioiden väliset korrelaatiot eri taajuuskaistoille. Siten koherenssiarvo 1 kuvastaisi täysin samanlaista taajuusjakaumaa äänen ja aivovasteen välillä ja arvo 0 kuvastaisi täysin erilaista taajuusjakaumaa. Koherenssin tarkasteluun valittiin magnetometreilla mitattu aineisto, koska niiden tuottama signaali on suoraan käytettävissä ilman muunnoksia (toisin kuin gradiometreilla mitattu aineisto, joka pitää yhdistää eri gradiometrityyppien yli). Puolieroja tarkasteltiin laskemalla keskiarvot sekä vasemman että oikean puolen kaikkien kanavien koherensseille. Nämä puolikohtaiset keskiarvot laskettiin erikseen lapsille ja aikuisille.

## 3.3 Tilastollisen analyysin vaiheet ja muuttujien jakaumatarkastelut

Tilastollinen analyysi suoritettiin SPSS Statistics 24 -ohjelmistolla kahdessa eri vaiheessa. Ensimmäisen tutkimuskysymyksen mukaan tarkasteltiin eroja koherenssissa eri aivopuoliskoilla ja eri ikäryhmissä toistomittausten varianssianalyysin (ANOVA) avulla. Toiseksi tarkasteltiin koherenssin voimakkuuden ja kognitiivisissa tehtävissä suoriutumisen välisiä yhteyksiä korrelaatiomatriisin avulla. Tässä kappaleessa esitellään menetelmät ja tarkastellaan muuttujien jakaumien normaalisuutta.

Ensimmäisessä vaiheessa toistomittausten ANOVA (ärsyketyyppi (sanat, lauseet) x aivopuolisko (oikea, vasen) x ikäryhmä (lapset, aikuiset) suoritettiin molemmille valituille taajuuskaistoille erikseen. Toistomittausten ANOVA:n oletuksena on muuttujien perusjoukon jakauman normalisuus ja varianssien yhtäsuuruus. Aivomuuttujien jakaumien oletetaan olevan ihmispopulaatiossa normaalisti jakautuneita, mutta nyt kerätyn aineiston normalisuutta silti tarkasteltiin ennen analyysia. Koherenssimuuttujien normalisuustarkasteluissa kaikki paitsi oikean aivopuoliskon theeta-taajuuskaitan muuttuja sanoille ( $p = 0,008$ ) olivat normaalisti jakautuneita Kolmogorov-Smirnovin testin mukaan. Shapiro-Wilkin testin mukaan kaikki muuttujat olivat normaalisti jakautuneita. Vasemman ai-

vopuoliskon theeta-taajuuskaistan koherenssimuuttuja sanoille on normaalisti jakautunut, mutta Kolmogorov-Smirnovin testin arvo on lähellä raja-arvoa ( $p = 0,058$ ). Kun muuttujaa tarkasteltiin histogrammin avulla, voitiin todeta, että muuttuja on hieman vasemmalle vino. Kuitenkaan laatikko-viik-sikaavion perusteella voimakkaita äärimmäisiä havaintoja ei näyttäisi olevan, mikä myös tukee muut-tujan sisällyttämistä tarkasteluihin.

Kognitiivisten tehtävien tulosten ja koherenssimuuttujien välisten yhteyksien tarkastelussa käytettiin Spearmanin korrelaatiokertoimia, koska kognitiivisten tehtävien tulosmuuttujissa oli useita, joiden jakaumat eivät täyttäneet normalisuusoletuksia. Osa käytetyistä kognitiivisista mittareista on suomalaisella aineistolla standardoituja tutkimusmenetelmiä, joilla mitattujen muuttujien odotetaan jakautuvan normaalisti väestössä. Tässä käytetyistä menetelmistä sellaisia olivat WAIS-IV -, WISC-IV - ja WPPSI-III -tehtäväpatteristojen avaruudellisen hahmottamisen tehtävät ja WAIS-IV:n ja WISC-IV:n työmuistitehtävä. Muista tehtävistä RAN, lauseiden toistotehtävä, epäsanonjen toistotehtävä ja puheen tuoton motoriikan tehtävä on standardoitu käyttöön suomalaisilla lapsilla, mutta tässä tutkimuksessa tehtäviä käytetään osin laajemmalla ikäjakaumalla, kuin mihin ne on standardoitu.

Kognitiivisten tehtävien muuttujista lasten kuutiotehtävät-osatehtävän (yhdistetty WISC-IV ja WPPSI-III), äänneiden prosessoinnin tehtävän suun motoriikan tehtävän, RAN esineet ja kirjaimet ja työmuistitehtävä aikuisilla olivat normaalisti jakautuneita Kolmogorov-Smirnovin testin mukaan. Lasten numerosarjatehtävän ( $p = 0,037$ ), merkityksettömien sanojen toistotehtävän ( $p = 0,001$ ) ja aikuisten kuutiotehtävät-osatehtävän ( $p = 0,036$ ) tulosten jakaumat eivät olleet normaalisti jakautuneita. Shapiro-Wilkin testin mukaan merkityksettömien sanojen toistotehtävän ( $p = 0,002$ ), RAN: esineet ( $p = 0,016$ ) ja aikuisten kuutiotehtävät -osatehtävän ( $p = 0,012$ ) jakaumat eivät olleet normaalisti jakautuneita. Huipukkuudeltaan normaalijakaumasta poikkesivat lasten numerosarjatehtävän jakauma ( $kurtosis = -1,009$ ) ja merkityksettömien sanojen toiston tehtävän jakauma ( $kurtosis = -1,004$ ), jotka olivat molemmat latistuneita. Aikuisten kuutiotehtävät-osatehtävän päättelyn tehtävän tulosten jakaumassa oli yksi poikkeavan pieni havainto ja jakauma oli vasemmalle vino ( $skewness = -1,492$ ).

## 4 TULOKSET

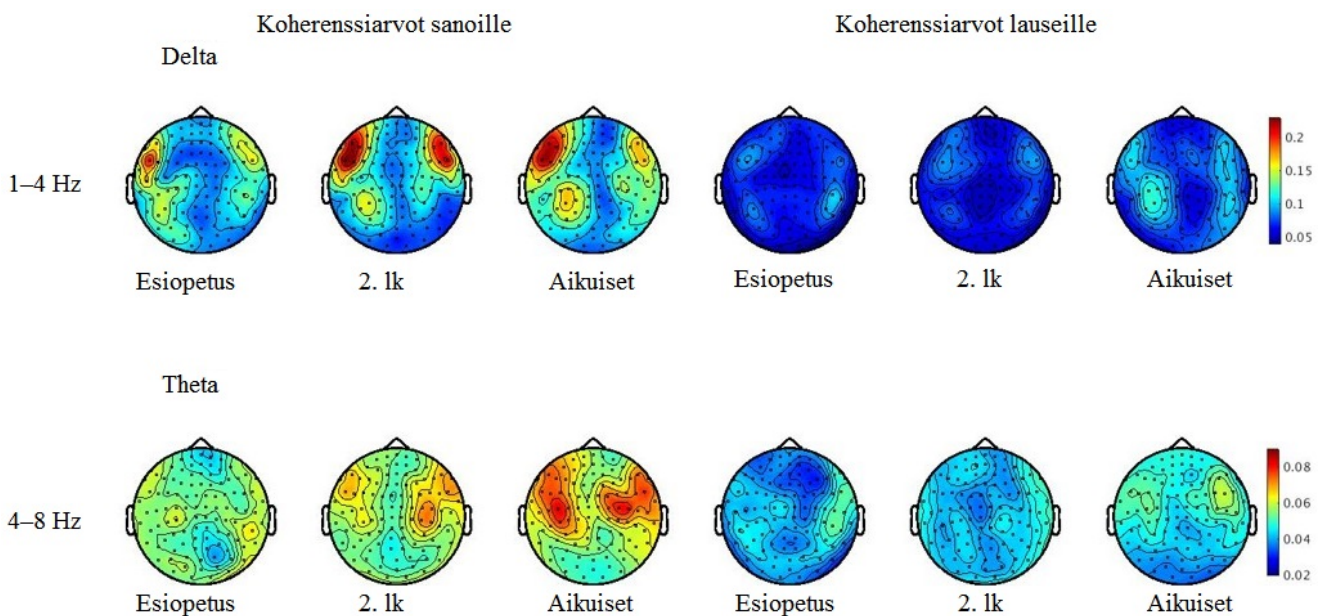
Tässä luvussa kerätty aineisto esitellään tilastollisten tunnuslukujen avulla ja tarkastellaan tutkimuskysymysten mukaisia tuloksia. Ensimmäisessä vaiheessa tarkasteltiin eroja koherenssissa eri aivo-puoliskoilla ja eri ikäryhmissä visuaalisesti ja toistomittausten varianssianalyysin (ANOVA) avulla.



Toisen tutkimuskysymyksen mukaan tarkasteltiin koherenssimuuttujien ja kognitiivisten tehtävien tuloksien välisiä yhteyksiä.

Kuvassa 5 aivokuoren aktivaation ja äänen välille lasketun koherenssimuuttujan jakautuminen on esitetty visuaalisesti pään alueella sanoille ja lauseille eri taajuuskaistoilla. Kuvaa varten lapset on jaettu kahteen ryhmään, esiopetuksen ja toisen luokan oppilaiden ryhmään iän mukaan. Kuvien perusteella voimakkaimmat koherenssiarvot asettuvat kaikissa ryhmissä pään ohimoalueille, joille sijoituvat myös kuuloaivokuoret. Taulukoissa 2 ja 3 esitellään koherenssimuuttujan tilastolliset tunnusluvut vasemmalla ja oikealla aivopuoliskolla aikuisilla ja lapsilla. Kuvassa 5 ja taulukoissa 2 ja 3 esitettyjen arvojen perusteella koherenssi on voimakkaampaa sanaärsykkeiden kuin lauseärsykkeiden yhteydessä. Havaittujen erojen merkitsevyyttä tarkastellaan toistomittausten ANOVA:lla.

Kognitiivisten tehtävien tulosten muuttujien tilastolliset tunnusluvut on esitelty taulukossa 4. Keskiarvojen tarkastelun perusteella suoritukset ovat tyypillisellä suoritusalueella, vaikka tehtäväkohtaista vaihtelua tuleekin esille. Tehtävien tulosten muuttujien jakaumien tarkastelu on esitelty luvussa 3.3. Ryhmäkoot ( $n$ ) vaihtelevat sen mukaan, mitkä tehtävät tehtiin kullekin ikäryhmälle. Lasten merkityksettömien sanojen toiston  $n$  on myös pienempi, koska alle neljävuotiaalle osallistujalle ei ollut saatavilla standardipistemäärää tehtävään ja yksi osallistujista ei tehnyt tehtävää.



KUVA 5. Koherenssimuuttujan jakautuminen pään pinnalla eri ärsyketyypeillä ja eri taajuuskaistoilla. Lasten ryhmä on tässä kuvassa jaettu kahteen ryhmään, esiopetuksen ja toisen luokan ikäisten ryhmiin

TAULUKKO 2. Delta-taajuuskaistan koherenssimuuttujien vaihteluvälit, keskiarvot, keskihajonnat ja otoskoot eri ärsyketyypeille ja eri ikäryhmille

Aivopuo- lisko	Ärsyke- tyyppi	Ikäryhmä	min	max	ka	kh	n
Vasen	sanat	lapset	0,07	0,17	0,11	0,03	34
		aikuiset	0,09	0,15	0,12	0,02	19
		yht.			0,12	0,02	53
vasen	lauseet	lapset	0,04	0,10	0,07	0,01	34
		aikuiset	0,06	0,11	0,08	0,01	19
		yht.			0,07	0,02	53
oikea	sanat	lapset	0,06	0,14	0,10	0,02	34
		aikuiset	0,08	0,15	0,11	0,02	19
		yht.			0,10	0,02	53
oikea	lauseet	lapset	0,05	0,10	0,07	0,01	34
		aikuiset	0,05	0,12	0,08	0,02	19
		yht.			0,07	0,02	53

TAULUKKO 3. Theeta-taajuuskaistan koherenssimuuttujien vaihteluvälit, keskiarvot, keskihajonnat ja otoskoot eri ärsyketyypeille ja eri ikäryhmille

Aivopuo- lisko	Ärsyke- tyyppi	Ikäryhmä	min	max	ka	kh	n
Vasen	sanat	lapset	0,04	0,07	0,05	0,01	34
		aikuiset	0,05	0,09	0,07	0,01	19
		yht.			0,06	0,01	53
vasen	lauseet	lapset	0,03	0,05	0,04	0,00	34
		aikuiset	0,04	0,06	0,05	0,01	19
		yht.			0,04	0,01	53
oikea	sanat	lapset	0,04	0,07	0,05	0,01	34
		aikuiset	0,05	0,08	0,07	0,01	19
		yht.			0,06	0,01	53
oikea	lauseet	lapset	0,03	0,06	0,04	0,01	34
		aikuiset	0,04	0,06	0,05	0,00	19
		yht.			0,04	0,01	53

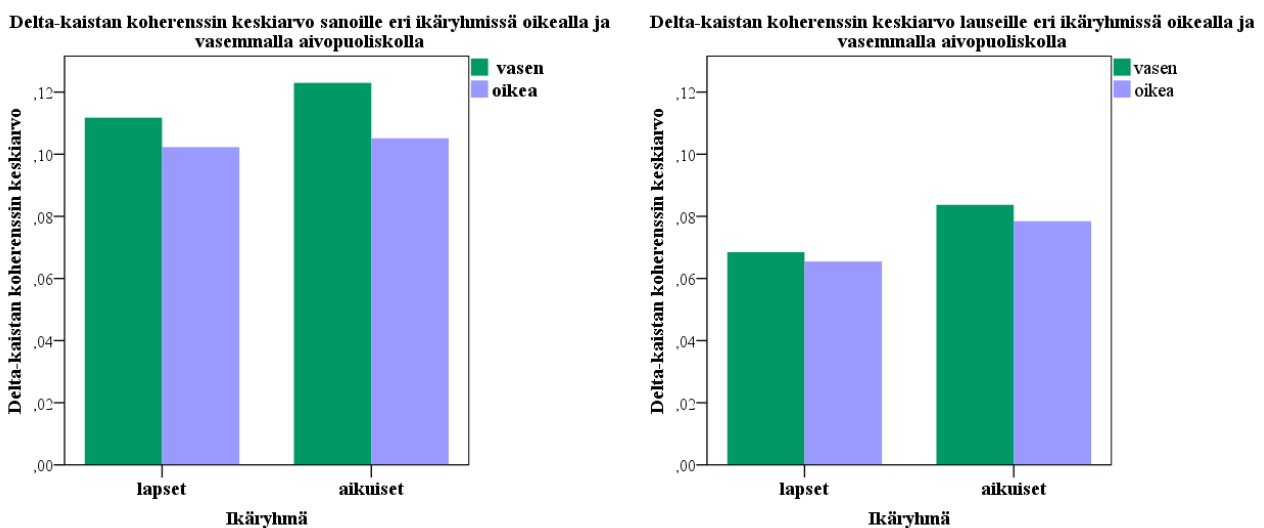
TAULUKKO 4. Kognitiivisten tehtävien tulokset: SP: standardipistemäärä, RP: raakapistemäärä

Tehtävä, muuttuja	Ryhmä	n	min	max	ka	sd
Kuutiotehävät, SP (WISC-IV ja WPPSI-III yhdessä)	lapset 4–9	34	4	17	10,56	3,34
Numerosarjatehtävä, SP (WISC-IV)	lapset 7–9	22	6	13	9,95	2,15
Merkityksettömien sanojen toisto, SP (NEPSY)	lapset 4–9	32	5	13	10,09	2,43
Äänteiden prosessointi, SP (NEPSY II)	lapset 4–9	34	6	16	11,32	2,29
Suun motoriset sarjat, SP (NEPSY)	lapset 4–9	34	5	16	10,38	2,81
Lauseiden toisto (NEPSY II), RP	lapset 4–9	34	17	30	25,62	3,08
RAN: esineet, suoritus aika sekunteina	lapset 4–9	53	27,00	97,68	53,54	18,66
RAN: kirjaimet, suoritus aika sekunteina	lapset 7–9 ja aikuiset	40	4,00	60,17	27,19	11,48
Kuutiotehävät, SP (WAIS-IV)	aikuiset	19	2	16	11,26	3,21
Numerosarjatehtävä, SP (WAIS-IV)	aikuiset	19	7	19	11,26	2,96

## 4.1 Toistomittausten varianssianalyysi

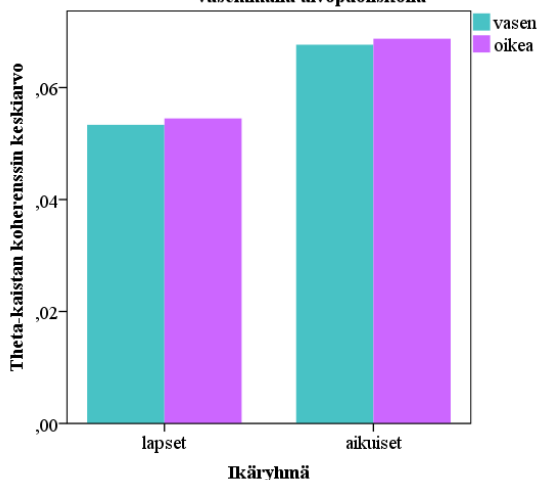
Delta-taajuuskaistan tarkasteluissa toistomittausten ANOVA osoitti merkitsevän yhdysvaikutuksen ( $F(1, 31) = 4,499, p = 0,039$ ) ärsyketyypin ja aivopuoliskon välillä. Tämän yhdysvaikutuksen efekti-koko oli keskisuuri ( $\eta_p^2 = 0,081$ ). Kun ärsyketyypinä oli sanat, vasemman aivopuoliskon aktivaatio oli suurempaa myös *post hoc*-tarkastelussa t-testin perusteella  $t(52) = 3,154, p = 0,003$  (2-suunt.). Tulokset on esitetty graafisesti kuvassa 6, joka kuvaa koherenssimuuttujan voimakkuutta delta-kaistalla eri aivopuoliskoilla sanaärsyksen ja lauseärsyksen yhteydessä.

Myös theeta-taajuuskaistan tarkasteluissa toistomittausten ANOVA:n mukaan löytyi tilastollisesti merkitsevä yhdysvaikutus ärsyketyypin ja ikäryhmän välillä ( $F(1, 51) = 17,907, p = 0,001$ ). Tämän yhdysvaikutuksen efekti-koko oli suuri ( $\eta_p^2 = 0,260$ ). Aikuisten ryhmässä koherenssi oli voimakkaampaa molempien ärsyketyyppien yhteydessä. Keskiarvojen erot ryhmien välillä vahvistuivat *post hoc* -tarkasteluna tehdyissä riippumattomien otosten t-testeissä kaikille koherenssimuuttujille: vasemman aivopuoliskon aktivaatiossa sanaärsyksille:  $t(51) = -6,658, p = 0,001$  (2-suunt.), oikealla sanaärsyksille:  $t(51) = -6,327, p = 0,001$  (2-suunt.), vasemmalle puolelle lauseärsyksille:  $t(26,905) = -3,277, p = 0,003$  (2-suunt.) ja oikealle puolelle lauseärsyksille:  $t(51) = -3,350, p = 0,002$  (2-suunt.). Kuvassa 7 on esitetty ryhmittäin koherenssimuuttujan voimakkuus theeta-kaistalla eri aivopuoliskoilla sanaärsyksen yhteydessä vasemmalla ja lauseärsyksen yhteydessä oikealla.

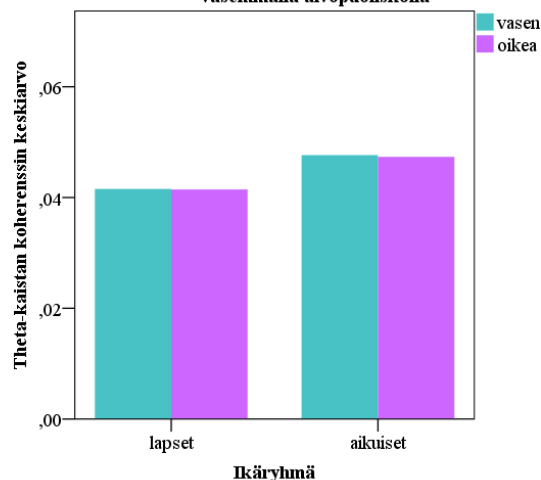


KUVA 6. Delta-kaistan koherenssin keskiarvo sanoille ja lauseille lasten ja aikuisten ryhmissä vasemmalla (vihreä) ja oikealla (lemmikinainen) aivopuoliskolla

Theta-kaistan koherenssin keskiarvo sanoille eri ikäryhmissä oikealla ja vasemmalla aivopuoliskolla



Theta-kaistan koherenssin keskiarvo lauseille eri ikäryhmissä oikealla ja vasemmalla aivopuoliskolla



KUVA 7. Theta-kaistan koherenssin keskiarvo sanoille ja lauseille lasten ja aikuisten ryhmissä vasemmalla (turkoosi) ja oikealla (vaaleanpunainen) aivopuoliskolla

## 4.2 Korrelaatiokerrointen tarkastelu

Kognitiivisten tehtävien tulosten ja koherenssiarvojen välisiä korrelaatioita tarkasteltiin Spearmanin korrelaatiokertoimilla. Korrelaatiokertoimet on esitetty taulukossa 5. Tilastollisesti merkitsevä korrelaatio löytyi lasten kuutiotehtävät-osatehtävän ja oikean puolen delta-kaistan sanojen koherenssiarvon välillä ( $p = 0,014$ , Spearman = 0,419). Nopean sarjallisen nimeämisen tehtävien (RAN) tulosten ja koherenssimuuttujien välillä löydettiin useita korrelaatioita, mutta sirontakuvioiden tarkasteluiden perustella todettiin, että kyseiset tulokset johtuvat lasten ja aikuisten tutkittavien ryhmien välisistä eroista, eivätkä kerro tutkimuskysymyksen asettelun mukaisesta ilmiöstä, jossa parempi kognitiivinen suoriutuminen olisi yhteydessä suurempaan koherenssiin.

TAULUKKO 5. Spearmanin korrelaatiokertoimet kognitiivisten tehtävien ja koherenssimuuttujan välisille tarkasteluille. KU = lasten kuutiotehtävät, NS = lasten numerosarjatehtävät, ST = merkityksettömyyden sanojen toisto, ÄP = äänteiden prosessointi, SM = suun motoriset sarjat, RE = RAN esi-  
neet, RK = RAN kirjaimet, LT = lauseiden toisto, ku = kuutiotehtävät aikuisille, ns = numerosarja-  
tehtävät aikuisille. \*:  $p = 0,05$ , \*\*:  $p = 0,01$

	Koherenssit sanaärsyksen yhteydessä				Koherenssit lauseärsyksen yhteydessä			
	Delta vasen	Delta oikea	Theeta vasen	Theeta oikea	Delta vasen	Delta oikea	Theeta vasen	Theeta oikea
KU	0,181	0,419*	0,062	0,328	-0,303	0,336	0,184	0,228
NS	0,177	0,209	0,198	0,367	0,009	0,372	0,131	-0,153
ST	0,161	-0,054	0,200	0,210	0,114	-0,030	-0,014	0,078
ÄP	0,085	-0,070	0,133	0,221	0,037	0,071	0,214	0,123
SM	0,112	0,137	-0,030	0,232	0,207	0,087	0,089	0,007
RE	-0,344*	-0,083	-0,638**	-0,636**	-0,366**	-0,348*	-0,358**	-0,350*
RK	-0,054	0,053	-0,569**	-0,571**	-0,424**	-0,274	-0,334*	-0,249
LT	0,281	0,250	0,281	0,280	0,031	0,170	0,302	-0,012
ku	-0,231	0,064	0,011	0,013	0,421	0,123	-0,183	-0,332
ns	0,105	-0,034	0,125	0,166	0,157	0,011	0,170	-0,112

## 5 POHDINTA

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli lisätä tietoa siitä, miten ihmisäivot seuraavat puheärsyksen ver-  
hokäyrää ajallisesti ja vaikuttaako kehitys tai kognitiivisten kykyjen taso puheärsyksen seuraami-  
seen. Ensimmäisen tutkimuskysymyksen mukaan puheen seuraamista aivokuorella tarkasteltiin  
kuuntelutehtävän yhteydessä mitatun magneettiaivokäyrän ja kuunnellun sanan tai lauseen äänen ver-  
hokäyrän välille laskettujen koherenssiarvojen avulla. Koherenssin voimakkuuden jakautumista eri  
aivopuoliskoille ja sen yhteyttä ikäryhmään tarkasteltiin toistomittausten varianssianalyysillä. Toi-  
sessa tutkimuskysymyksessä kartoitettiin kuuloaivokuoren koherenssin voimakkuuden ja kielellisen  
kognitiivisen kykytason välisiä yhteyksiä. Kognitiivisia kykyjä mitattiin yleisesti käytössä olevilla  
mittareilla. Koherenssin voimakkuuden ja kognitiivisten kykyjen tehtävien tulosten välisiä yhteyksiä  
tarkasteltiin Spearmanin korrelaatiokertoimien avulla.

Tämä tutkimus ei tukenut aiempia löydöksiä, joiden mukaan hitaammat taajuudet, joihin delta-  
ja theeta-taajuudet kuuluvat, korostuvat erityisesti oikealla aivopuoliskolla (Poeppe & Giraud,  
2012a; 2012b). Sen sijaan sanaärsykkeiden kuuntelun aikana delta-taajuudella tapahtuvan koherens-  
sin huomattiin toistomittausten ANOVA:n ja *post hoc* -tarkasteluiden perusteella olevan voimak-  
kaampaa vasemmalla aivopuoliskolla sekä lapsilla että aikuisilla. Puolieroa ei tullut esille pidempien  
lauseärsykkeiden kuuntelun yhteydessä. Theeta-taajuuden koherenssin todettiin toistomittausten  
ANOVA:n ja *post hoc* -tarkasteluiden perusteella olevan suhteellisesti voimakkaampaa aikuisilla,

mikä poikkeaa aiemmasta tutkimuksesta. Aikuisten ryhmässä koherenssi oli voimakkaampaa molempien ärsyketyyppien yhteydessä. Aiempi tutkimus on antanut viitteitä, että lapsilla theeta-taajuuskaisella tapahtuva aktiivisuus olisi voimakkaampaa kuin aikuisilla ja että theeta-aktiivisuuden väheneminen kertoisi hermostollisesta kypsymisestä (Segalowitz ym. 2010; Whitford ym., 2007; Gomez ym., 2017). Tosin nämä puolierot esiintyvät eri tavoin lepotilan ja kuuloärsykkeen käsittelyn aikana (Giraud & Poeppel, 2012a, 514–515). Theeta-kaistan toiminnan lateralisaatioissa ei havaittu merkitseviä eroja tässä tutkimuksessa.

Kielellisen kykytason ja kehityksen yhteyksistä koherenssin lisääntymiseen ei löytynyt tutkimuskysymyksen kannalta merkityksellisiä yhteyksiä Spearmanin korrelaatiokerrointen tarkasteluissa. Tämä eroaa aiemmista tutkimuksista, joissa muun muassa heikko aivotason delta- ja theeta-taajuuskaistoihin mukautuminen on liitetty heikompaan kielelliseen suoriutumisen, esimerkiksi prosodian ja tavupainojen havaitsemisen sekä fonologisen erottelun osalta (Goswami, 2011; Abrams ym., 2009; Clunies-Ross ym., 2018). Vasemman aivopuoliskon delta-kaistan koherenssin ja visuo-konstruktiota mittaavaan tehtävän välillä havaittiin tilastollisesti merkitsevä korrelaatio lapsilla. Tehtävä ei kuitenkaan liity kielelliseen prosessointiin, vaan se oli sisällytetty tutkimukseen vain vertailukohdaksi kielellisille menetelmille. RAN-tehtävien ja koherenssimuuttujien välillä havaittiin useita korrelaatioita, mutta tulokset osoittautuivat hajontakuvioiden tarkasteluissa johtuvan lähinnä eroista eri tutkimusryhmien välillä, eivätkä niinkään eroista kognitiivisessa suoriutumisessa.

Keskeisiä menetelmällisiä tekijöitä, jotka voivat vaikuttaa tämän tutkimuksen eroavaisuuksiin aiemmista tutkimuksista, ovat MEG- ja EEG-tutkimusmenetelmien erot, erot ärsyketyypeissä ja niiden esitystavassa sekä erot tutkimusten otosten suuruudessa. Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan ilmiöitä, jotka voisivat selittää eroja aiempien tutkimusten ja tämän tutkimuksen tulosten välillä sekä pohditaan mahdollisia keinoja kohentaa tulevien tutkimusten luotettavuutta ja yhteneväisyyttä. Lopuksi arvioidaan tämän tutkimuksen rajoitteita ja vahvuuksia ja tehdään yhteenveto.

## **5.1 MEG ja EEG**

Osassa aiemmista tutkimuksista, jotka tutkivat puheen verhoikäyrän seuraamista aivokuorella, on käytetty menetelmänä EEG:tä MEG:n sijaan (Clunies-Ross ym., 2018; Telkemeyer ym., 2009; 2011; Abrams ym., 2008; 2009, Hämäläinen ym., 2019). MEG mittaa aivokuorelta lähteitä, jotka ovat tangentiaalisia suhteessa pään muotoon, mutta EEG:llä havaitaan myös radiaalisia, eli pään säteen suun-

taisia lähteitä (Hari & Puce 2017). Kuuloaivokuorelta on havaittu molemman suuntaisia lähteitä. Tangentiaalisia lähteitä on havaittu temporaalilohkon yläpinnoilta, kun taas radiaaliset lähteet ovat paikantuneet temporaalilohkon lateraalisemmille pinnoille (Ponton ym., 2002; Ruhnau ym., 2011). Sekundaarisen kuuloaivokuoren, esimerkiksi ylemmän temporaalipoimun (ks. luku 1, KUVA 1) lähteet voivatkin näkyä heikommin MEG:lla kuin EEG:lla mitattaessa (Ponton ym., 2002; Clunies-Ross ym., 2018). Tämä voi osaltaan selittää nyt saatujen tutkimustulosten eroavaisuuksia AST-malliin ja aiempiin tutkimustuloksiin. On mahdollista, että AST-mallin mukainen lateralisaatio näkyy selkeämmin juuri radiaalisissa lähteissä, koska tässä tutkimuksessa ei havaittu aiemman tutkimuksen mukaisia puolieroja. Jatkotutkimuksissa olisi tärkeää paikantaa tarkemmin lähdetasolla radiaalisia ja tangentiaalisia lähteitä puheen rytmittymisen aikana. MEG- ja EEG-menetelmät täydentäisivät toisiaan samanaikaisessa mittauksessa. Lähdetason tutkimuksessa myös tarkka aivoanatomian tarkastelu on tärkeää ja siksi tutkimukseen tulisi sisällyttää myös rakenteellinen aivokuvantaminen, kuten MRI.

## 5.2 Toistojen ja osallistujien määrä

Aiemmassa tutkimuksessa on käytetty vaihtelevasti erilaisia ääniärsyketyyppejä ja toistomääriä tutkimustehtävissä. Osassa tutkimuksista ärsykkeenä ei ole käytetty luonnollista puheärsykettä, vaan ääniä, jotka on muokattu sisältämään vaihtelua theeta- ja gamma-taajuuskaistoilla (Clunies-Ross ym., 2018; Telkemeyer ym., 2009; 2011; Luo & Poeppel, 2012; Hämäläinen ym., 2019). Tämänkaltaiset ärsykkeet, jotka on manipuloitu erityisesti sisältämään nopeasti muuttuvia tai hitaasti muuttuvia taajuuksia, voivat mahdollisesti korostaa aivopuoliskojen toiminnallisia eroja, vaikka erot eivät olisikaan yhtä voimakkaita vasteena luonnolliseen puheeseen. Tutkimuksissa myös ärsykkeiden toistomäärissä on vaihtelua. Osassa mainituista tutkimuksista yksittäisten lauseiden toistojen määrät ovat suuria. Abramsin ja kollegoiden (2008; 2009) tutkimuksia varten koehenkilöt kuuluivat samaa lausetta 3000 kertaa kolmella eri äänensävyllä luettuna, tuhat kertaa kutakin äänensävyä kohden. Clunies-Rossin ja kumppaneiden (2018) tutkimuksessa samasta ääniärsykkeestä esitettiin kullakin tutkimuskerralla keskimäärin 161 toistoa. Luon & Poeppelin (2007) tutkimuksessa analyysiin valituista toistoista oli kunkin saman sisältöisen lauseen osalta 84, vaikka ne esitettiin neljällä eri tavalla muokattuina. Tähän tutkimukseen verrattavia pienempiä ärsykekohtaisia toistomääriä käytettiin puheärsykeille Telkemeyerin ja kumppaneiden (2008; 2009) tutkimuksissa, joissa kutakin neljää ärsyketyyppeä toistettiin vain 23 kertaa. Suuret toistomäärät helpottavat aivoista mitattavan aktiivisuuden erottamista kohinasta, mutta runsas toistojen määrä eroaa luonnollisista puhetilanteista. Erot tämän tutkimuksen

ja suurempia toistomääriä käyttäneiden tulosten välillä herättävät kysymyksen siitä, onko toistojen määrällä oma vaikutuksensa kuuloaivokuoren rytmittymiseen puheärsykkeeseen tai aivotoiminnan lateralisaatioon. Jatkossa toistomäärien vaikutusta voisi tutkia vertailemalla luonnollisen ja monimuotoisen puheen rytmittymistä aivoissa usein toistettujen ääni- ja puheärsykkeiden rytmittymiseen.

Tutkimusten osallistujien määrät AST-mallin tutkimuksissa ovat vaihdelleet melko paljon. Luon ja Poeppelin (2007) tutkimuksessa, jossa theta-taajuuskaistan seuraamisen ilmiö ensimmäisenä havaittiin MEG:n avulla, oli vain kuusi osallistujaa. Myös heidän myöhemmässä tutkimuksessaan (Luo & Poeppel, 2012), jossa käytettiin puheärsykkeen sijasta muokattua ääniärsykettä, tutkittavia oli vain 12. Telkemeyerin ja kumppanien (2009; 2011) tutkimuksissa aineistoa kerättiin 22 osallistujalta. Clunies-Rossin ja kumppaneiden (2018) EEG-tutkimuksessa ryhmäkoko oli suurempi 50 osallistujan määrällä. Pienet ryhmäkoot heikentävät aiempien tutkimusten luotettavuutta ja vertailtavuutta tähän tutkimukseen. Ryhmäkoko on myös yksi tämän tutkimuksen rajoitteista, koska 53 tutkittavaa jakautuivat 34 lapsen ja 19 aikuisen ryhmiin. Esimerkiksi kognitiivisten kykyjen mittareiden osalta pienet tehtäväkohtaiset tutkittavien määrät ovat voineet heikentää tulosten luotettavuutta ja vaikuttaa siihen, etteivät tulokset olleet kaikkien menetelmien osalta normaalisti jakautuneita. Ryhmien pienuuden vuoksi myöskään yksilöllisiä kognitiivisten taitojen eroja kehityksessä ei voitu tarkastella luotettavasti. Tilastollisten testien voimakkuus kohenee otoskoon kasvattamisella, mikä heikentää satunnaisten virheiden todennäköisyyttä (Coolican, 2014, 477). Jatkossa AST-mallia tulisikin tutkia suuremmilla tutkittavien joukoilla yhtenäisempien tulosten saamiseksi.

### **5.3 Tutkimuksen arviointi**

Tässä tutkimuksessa menetelmien osalta kognitiivisten tehtävien ja aivotoiminnan mittauksen tulosten yhdistämisessä on rajoitteita. Nyt käytettyjä kognitiivisia tutkimusmenetelmiä ei ole kehitetty kohdennetusti koherenssin kehitystä mielessä pitäen, vaan ne mittaavat laajemmin erilaisia kielellisiä ja puheen käsittelyyn liittyviä ilmiöitä. Myös muut kuin kuullun puheen prosessointiin liittyvät kyvyt kuten työmuisti, artikulaatio ja suoritusnopeus vaikuttavat tutkimuksessa käytettyjen kielellisten kognitiivisten tutkimusmenetelmien tuloksiin. Toisaalta standardoitujen tutkimusmenetelmien käyttö on vahvuus, eikä tutkimuksen yhteydessä ollut mahdollista kehittää uusia menetelmiä taitotason mittaamiseen. Jos tämä olisi ollut mahdollista, myös kognitiivisten kykyjen mittaaminen aivotoiminnan mittauksen aikana olisi voinut olla hedelmällistä, koska silloin kaikki käytetty tieto olisi saatu kerättyä samalla tutkimuskerralla ja samassa tutkimusympäristössä.



Tässä tutkimuksessa käytetty poikittaistutkimusasetelma oli rajoite kehityksellisten ilmiöiden tutkimukselle. Tutkimusotos rajautui kahteen ikäryhmiltään erilliseen lasten ja aikuisten joukkoon. Erillisiä ikäryhmiä tutkimalla useita ikäluokkia jää ikään kuin kehityksellisesti väliin, eikä tarkastelua voida tehdä portaittaisesti useissa ikävaiheissa tai yksilön kehitystä tarkastellen. Nyt tarkastelu kohdistuu lähinnä aikuisten ja lasten välisiin eroihin. Tässä yhteydessä ei kuitenkaan ollut mahdollista järjestää tutkimusta pitkittäistutkimuksena, jossa kehitystä olisi tutkittu pidemmällä aikavälillä, vaikka se olisikin kertonut kehityksellisistä ilmiöistä tarkemmin.

Tutkimusasetelman osalta rajoituksena voi pitää myös tarkastelukulman tiukkaa rajaamista. Tässä tutkimuksessa keskityttiin vain pieneen osaan puheen käsittelyä. Nyt keskityttiin vain puheen kuunteluun, eikä tarkasteltu tarkemmin puheen tuottoa. Puheen tuottoon liittyviä tuloksia raportoidaan tarkemmin Orsolya B. Kolozsvárin väitöskirjassa (tulossa 2020). Luonnollisessa sosiaalisessa puhetilanteessa auditiiviseen tietoon yhdistyy yleensä myös visuaalista tietoa, esimerkiksi puhujan kasvojen liikkeistä. Tämä audiovisuaalinen integraatio jää nyt tarkastelun ulkopuolelle, vaikka se vaikuttaa puheen havainnointiin luonnollisissa tilanteissa (Giraud & Poeppel, 2012b, 237).

Tässä tutkimuksessa gamma-taajuudet oli rajattu tutkimuskysymyksen ulkopuolelle. Gamma-taajuuksien noninvasiivinen tutkimus on haastavaa (Whitham ym., 2007). Kuitenkin, koska nyt saatiin osin aiempaan tutkimukseen suhteutettuna täysin päinvastaisiakin tuloksia, olisi mielenkiintoista tarkastella lateralisoituvatko gamma-taajuudet poikkeavasti ja onko niissä viitteitä poikkeavista eroista eri ikäryhmien välillä. Gamma-taajuuksiin liittyviä hankaluuksia lihasten liikeartefaktan osalta voisi koittaa lieventää laskennallisilla menetelmillä (Whitham ym., 2007).

Tutkimukseen osallistuminen perustui vapaaehtoisuuteen, mikä on voinut aiheuttaa valikoituneisuutta osallistujajoukossa. Lapsiperheet kutsuttiin Väestörekisterikeskuksesta saadun näytteen perusteella, mutta aikuistutkittavat tulivat tutkimukseen nähtyään mainoksen tutkimuksesta. Kaikki tutkimuksen aikuiset olivat nuoria yliopisto-opiskelijoita, mikä on voinut heikentää tutkimustuloksen yleistettävyyttä laajempaan ja monimuotoisempaan ihmispopulaatioon. Tutkimuksessa vahvuutena voi kuitenkin pitää sitä, että jo alkuvaiheista asti taustatekijöitä pyrittiin kartoittamaan mahdollisimman kattavasti. Tekijät, joiden epäiltiin voivan vääristää tuloksia, rajattiin tutkimuksen ulkopuolelle (ks. luku 2.1).

Tämän tutkimuksen tulokset eivät anna tukea AST-mallin mukaiselle käsitykselle hitaampien taajuuksien rytmittymisen painottumisesta oikealle aivopuoliskolle puheen kuuntelun aikana. Myös kehityksellisesti tulokset olivat aiempaan verrattuna päinvastaisia, koska hitaiden taajuuksien huomattiin rytmittyvän voimakkaammin aikuisilla. Kielellisen taitotason ja puheen taajuuksien rytmittymisen välillä ei löydetty yhteyksiä tässä käytetyillä menetelmillä. Poikkeavat tulokset liittynevät osin tämän tutkimuksen edellä mainittuihin rajoitteisiin, mutta tulosten epäyhteneväisyyteen voivat myös

osin vaikuttaa erot siinä, miten kuuloaivokuoren rytmittymistä puheeseen tai puheen kaltaiseen ärsykkeeseen on tutkittu, mitattu ja määritelty eri tutkimuksissa. Tässä tutkielmassa esitellyt tulokset osoittavat tarpeen uudelle tutkimukselle ja antavat yhden vertailukohdan tulevalle puheen aivotoinnin tarkastelulle.

## Lähteet

Aaltonen, O. (2006). Puhe ja kieli. Teoksessa H. Hämäläinen, M. Laine, O. Aaltonen & A. Revonsuo (toim.), *Mieli ja aivot: Kognitiivisen neurotieteen käsikirja* (s. 333–341). Turku: Kognitiivisen neurotieteen tutkimuskeskus, Turun yliopisto.

Abrams, D. A., Nicol, T., Zecker, S. & Kraus, N. (2008). Right-Hemisphere Auditory Cortex Is Dominant for Coding Syllable Patterns in Speech. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 28(15), 3958–3965.

doi:<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0187-08.2008>

Abrams, D. A., Nicol, T., Zecker, S. & Kraus, N. (2009). Abnormal Cortical Processing of the Syllable Rate of Speech in Poor Readers. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 29(24), 7686–7693.

doi:<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5242-08.2009>

Broca, P. (1861). NOUVELLE OBSERVATION D'APHÉMIE PRODUITE PAR UNE LÉSION DE LA MOITIÉ POSTÉRIEURE DES DEUXIÈME ET TROISIÈME CIRCONVOLUTIONS FRONTALES. *Bulletins de la Société anatomique de Paris*, 36, 398–407. Paris: Société Anatomique.

Buzsáki, G. & Wang, X. (2012). Mechanisms of Gamma Oscillations. *Annual Review of Neuroscience*, 35, 203–225. doi:<https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-062111-150444>

Clunies-Ross, K. L., Campbell, C., Ohan, J. L., Anderson, M., Reid, C. & Fox, A. M. (2018). Hemispheric asymmetries in rapid temporal processing at age 7 predict subsequent phonemic decoding 2 years later: A longitudinal event-related potential (ERP) study. *Neuropsychologia*, 111, 252–260. doi:<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.01.035>

Giraud, A., Poeppel, D. (2012a). Cortical oscillations and speech processing: Emerging computational principles and operations. *Nature Neuroscience*, 15(4), 511–517. doi:<https://doi.org/10.1038/nn.3063>

- Giraud, A., Poeppel, D. (2012b). Teoksessa D. Poeppel, T. Overath, A. N. Popper & R.R. Fay (toim.), *The Human Auditory Cortex* (s.149–160). New York, NY: Springer New York.
- Gómez, C. M., Rodríguez-Martínez, E., Fernández, A., Maestú, F., Poza, J. & Gómez, C. (2017). Absolute Power Spectral Density Changes in the Magnetoencephalographic Activity During the Transition from Childhood to Adulthood. *Brain Topography*, 30(1), 87–97. doi:<https://doi.org/10.1007/s10548-016-0532-0>
- Goswami, U. (2011). A temporal sampling framework for developmental dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(1), 3–10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.10.001>
- Gross, J., Baillet, S., Barnes, G. R., Henson, R. N., Hillebrand, A., Jensen, O., . . . Schoffelen, J. (2013). Good practice for conducting and reporting MEG research. *NeuroImage*, 65(100), 349–363. doi:<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.10.001>
- Hari, R. & Puce, A. (2017). *MEG-EEG primer*. New York, NY: Oxford University Press.
- Hickok, G., Poeppel, D. (2007). The cortical organization of speech processing. *Nature Reviews Neuroscience*, 8(5), 393–402. doi:<https://doi.org/10.1038/nrn2113>
- Hämäläinen, J. A., Ortiz-Mantilla, S., & Benasich, A. (2019). Change detection to tone pairs during the first year of life – Predictive longitudinal relationships for EEG-based source and time-frequency measures. *NeuroImage*, 198, 83–92. doi:<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.05.034>
- IBM Corporation, (2016). IBM SPSS Statistics for Windows, Version 24.0. Armonk, NY: IBM Corp.
- Kolozsvári, Orsolva B. (tulossa 2020). Väitöskirja. Jyväskylän yliopiston psykologian laitos.
- Korkman, M., Kirk, U., & Kemp, S. L. (1997). *NEPSY: Lasten Neuropsykologinen Tutkimus*. Helsinki: Psykologien Kustannus Oy.
- Korkman, M., Kirk, U. & Kemp, S. L. (2008). *Nepsy-II: Käsikirja I, Testin esitys- ja pisteytysohjeet*. Helsinki: Psykologien kustannus.
- Korkman, M., Kirk, U. & Kemp, S. L. (2008). *Nepsy-II: Käsikirja II Kehittely, käyttö ja psykometriset tiedot*. Helsinki: Psykologien kustannus.
- Luo, H. & Poeppel, D. (2007). Phase Patterns of Neuronal Responses Reliably Discriminate Speech in Human Auditory Cortex. *Neuron*, 54(6), 1001–1010. doi:<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.06.004>

- Luo, H. & Poeppel, D. (2012). Cortical Oscillations in Auditory Perception and Speech: Evidence for Two Temporal Windows in Human Auditory Cortex. *Frontiers in Psychology*, 3(170), 1–10. doi:<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00170>
- Luo, H., Wang, Y., Poeppel, D. & Simon, J. Z. (2006). Concurrent Encoding of Frequency and Amplitude Modulation in Human Auditory Cortex: MEG Evidence. *Journal of Neurophysiology*, 96(5), 2712–2723. doi:<https://doi.org/10.1152/jn.01256.2005>
- Mysid, (2008). File:Brain diagram without text.svg [kuva]. Viitattu 11.11.2019. Haettu osoitteesta: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brain\\_diagram\\_without\\_text.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brain_diagram_without_text.svg)
- Oostenveld, R., Fries, P., Maris, E., and Schoffelen, J.-M. (2011). Fieldtrip: open source software for advanced analysis of MEG, EEG, and invasive electrophysiological data. *Computational Intelligence and Neuroscience 2011*. doi:<http://dx.doi.org/10.1155/2011/156869>
- Pang, E. & Taylor, M. (2000). Tracking the development of the N1 from age 3 to adulthood: An examination of speech and non-speech stimuli. *Clinical Neurophysiology*, 111(3), 388–397. doi:[https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(99\)00259-X](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(99)00259-X)
- Parviainen, T., Helenius, P. & Salmelin, R. (2019). Children show hemispheric differences in the basic auditory response properties. *Human Brain Mapping*, 40(9), 2699–2710. doi:<https://doi.org/10.1002/hbm.24553>
- Poeppel, D. (2003). The analysis of speech in different temporal integration windows: cerebral lateralization as ‘asymmetric sampling in time’. *Speech Communication* 41(1), 245–255. doi:[https://doi.org/10.1016/S0167-6393\(02\)00107-3](https://doi.org/10.1016/S0167-6393(02)00107-3)
- Poeppel, D., Emmorey, K., Hickok, G. & Pylkkänen, L. (2012). Towards a new neurobiology of language. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 32(41), 14125–14131. doi:<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3244-12.2012>
- Ponton, C., Eggermont, J. J., Khosla, D., Kwong, B. & Don, M. (2002). Maturation of human central auditory system activity: separating auditory evoked potentials by dipole source modeling. *Clinical Neurophysiology*, 113(3), 407–420. doi:[https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(01\)00733-7](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(01)00733-7)
- Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., LaMantia, A., Mooney, R. D., . . . White, L. E. (2019). *Neuroscience*, 6.painos (s. 706–709). New York: Sinauer Associates
- Ruhnau, P., Herrmann, B., Maess, B. & Schröger, E. (2011). Maturation of obligatory auditory responses and their neural sources: Evidence from EEG and MEG. *NeuroImage*, 58(2), 630–639. doi:<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.06.050>

- Segalowitz, S. J., Santesso, D. L. & Jetha, M. K. (2010). Electrophysiological changes during adolescence: A review. *Brain and Cognition*, 72(1), 86–100.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.bandc.2009.10.003>
- Taulu, S., Simola, J., & Kajola, M. (2005). Applications of the signal space separation method. *IEEE transactions on signal processing*, 53(9), 3359–3372. doi:<https://doi.org/10.1109/TSP.2005.853302>
- Telkemeyer, S., Rossi, S., Nierhaus, T., Steinbrink, J., Obrig, H. & Wartenburger, I. (2011). Acoustic processing of temporally modulated sounds in infants: Evidence from a combined near-infrared spectroscopy and EEG study. *Frontiers in Psychology*, 2(62), 1–14.  
doi:<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00062>
- Wechsler, D. (2012a). *WAIS-IV: Esitys- ja pisteytyskäsikirja*. Helsinki: Psykologien kustannus.
- Wechsler, D. (2012b). *WAIS-IV: Teoriatausta, standardointi ja tulkinta*. Helsinki: Psykologien kustannus.
- Wechsler, D. (2009). *WPPSI-III: Käsikirja : Wechslerin älykkyystestistö esikouluikäisille*. Helsinki: Psykologien kustannus.
- Wechsler, D., Heiskari, P., Jakobson, B. & Marila, A. (2011a). *Wechsler intelligence scale for children, IV: Käsikirja I, Esitys- ja pisteytysohjeet*. Helsinki: Psykologien kustannus.
- Wechsler, D., Heiskari, P., Jakobson, B. & Marila, A. (2011b). *Wechsler intelligence scale for children, IV: Käsikirja II, Teoriatausta, standardointi ja tulkinta*. Helsinki: Psykologien kustannus.
- Wernicke C. (1874). *Der aphasische symptomcomplex. Ein psychologische studie auf anatomischer basis*. Breslau: Cohn & Weigert.
- Whitford, T. J., Rennie, C. J., Grieve, S. M., Clark, C. R., Gordon, E. & Williams, L. M. (2007). Brain maturation in adolescence: Concurrent changes in neuroanatomy and neurophysiology. *Human Brain Mapping*, 28(3), 228–237. doi:<https://doi.org/10.1002/hbm.20273>
- Whitham, E. M., Pope, K. J., Fitzgibbon, S. P., Lewis, T., Clark, C. R., Loveless, S., . . . Willoughby, J. O. (2007). Scalp electrical recording during paralysis: Quantitative evidence that EEG frequencies above 20 Hz are contaminated by EMG. *Clinical Neurophysiology*, 118(8), 1877– 1888.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.04.027>